

# **ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN TEÓRICO-EXPERIMENTAL DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN DE BIOMASA RESIDUAL CON ADICIÓN DE VAPOR**

**TESIS DOCTORAL**

**JORGE MARIO MENDOZA FANDIÑO**

**UNIVERSIDAD DEL NORTE  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA  
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DOCTORADO EN INGENIERÍA MECÁNICA  
BARRANQUILLA  
MAYO 2015**

# **ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN TEÓRICO-EXPERIMENTAL DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN DE BIOMASA RESIDUAL CON ADICIÓN DE VAPOR**

**JORGE MARIO MENDOZA FANDIÑO**

**Tesis doctoral para optar al título de Doctor en Ingeniería Mecánica**

**DIRECTOR**  
**Ph.D. INGENIERO MECÁNICO**  
**Antonio José Bula Silvera**

**UNIVERSIDAD DEL NORTE**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**  
**DIVISIÓN DE INGENIERÍAS**  
**PROGRAMA DOCTORADO EN INGENIERÍA MECÁNICA**  
**BARRANQUILLA**  
**MAYO 2015**

# TESIS DOCTORAL

## ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN TEÓRICO-EXPERIMENTAL DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN DE BIOMASA RESIDUAL CON ADICIÓN DE VAPOR

Realizada por: Jorge Mario Mendoza Fandiño

Dirigida por. Ph.D Antonio José Bula Silvera

Tribunal calificador:

Presidente: Ing. Alejandro Pacheco Sanjuán, PhD

Jurado 1: Ing. Marco Sanjuán Mejía, Ph.D

Jurado 2: Ing. Ricardo Vásquez Padilla, PhD

Jurado 3: Qco. Amner Muñoz Acevedo, PhD

UNIVERSIDAD DEL NORTE  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA  
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DOCTORADO EN INGENIERÍA MECÁNICA  
BARRANQUILLA  
MAYO 2015

*Naira Elena, Jesús Manuel, Jorge Mario y Juan Manuel,  
cada uno de mis logros es definitivamente  
por su amor, comprensión y apoyo, valorando  
cada meta en nuestras vidas, definitivamente  
lo hago por ustedes.*

*Inédita, Emigdio, Fanny, Federico, Gustavo, Emigdio José,  
Rosalía, Mami Isa, Emily, Shirley y Elsa gracias por quererme tanto  
a mis hijos y estar con ellos mientras no estuve,  
mis logros son de ustedes también.*

El presente trabajo se ha realizado en el marco de un proyecto de colaboración entre la Universidad del Norte, La universidad de Castilla la Mancha/España y Colciencias-SENA (CT 439-2007) Agradecemos el apoyo otorgado por el programa de financiación de Tesis doctorales de la Dirección de Investigaciones, Desarrollo e Innovación (DIDI) de la Universidad del Norte.

# Índice General

	Contenido	Pág.
	AGRADECIMIENTOS	i
	RESUMEN	ii
	INTRODUCCIÓN	1
<b>CAPÍTULO I.</b>	GENERALIDADES DE LA BIOMASA	11
<b>CAPÍTULO II.</b>	PROCESOS DE GASIFICACIÓN DE LA BIOMASA	21
<b>CAPÍTULO III.</b>	MODELADO TERMOQUÍMICO Y EXERGÉTICO DE LA GASIFICACIÓN	35
<b>CAPÍTULO IV.</b>	INSTALACIÓN EXPERIMENTAL Y METODOLOGÍA	45
<b>CAPÍTULO V.</b>	RESULTADOS OBTENIDOS	70
<b>CAPÍTULO VI.</b>	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	117
<b>CAPÍTULO VII.</b>	PUBLICACIONES, CONGRESOS, PROYECTOS, JORNADAS DE INVESTIGACIÓN, PREMIOS -RECONOCIMIENTOS Y REVISOR EN REVISTAS - CONFERENCIAS	122

# AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a:

Colciencias y al SENA por apoyar el proyecto "Caracterización del proceso de gasificación de los residuos de la Palma Africana, por medio de estudios de doctorado en la Universidad del Norte" ejecutado por la dirección de Investigaciones Desarrollo e Innovación (DIDI-Uninorte).

La Universidad de Castilla-la Mancha, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Ciudad Real, Grupo de Combustibles y Motores por aceptar mi estancia de investigación para la realización de mi tesis de postgrado.

Ph.D Antonio José Bula Silvera, Ph.D Juan José Hernández y Ph.D Guadalupe Aranda Almansa por su tiempo, asesoría, dedicación, y aceptación incondicional en la estancia investigativa.

El Grupo de Combustibles y Motores de la UCLM, por acogerme y facilitarme todos y cada uno de los instrumentos necesarios para la culminación de este proyecto.

El Grupo en Uso Racional de la Energía y Preservación del Medio Ambiente - UREMA- de la Universidad del Norte, por acogerme y facilitarme todos y cada uno de los instrumentos necesarios para la culminación de este proyecto.

El Grupo en Optimización de Procesos y Uso Racional de la Energía y la Biomasa- OPUREB- de la UPB Montería, por facilitarme todos y cada uno de los instrumentos necesarios para la culminación de este proyecto.

A mis amigos Antonio Bula, Lesmes Corredor, Adrián Ávila, Rafael Gómez, Arnaldo Verdeza, Arnold Martínez, Jaime Mesa, Argemiro Palencia, Juan Pablo Isaza, Erika Arenas, Zulamita Zapata, Andrés Jaramillo, Álvaro Arrieta, Sebastián Lafaurie, Mario Andrés Palacio, William Díaz y Juan Carlos Rojas gracias por su tiempo, amistad y apoyo incondicional.

# RESUMEN

El mundo actualmente se orienta al uso de combustibles alternativos para la generación de energía, debido al decremento de los combustibles fósiles y sus elevados costos, haciendo necesario la adopción de nuevas tecnologías que permitan diversificar el origen de la energía asegurando un desarrollo sostenible a la economía, al ambiente y la sociedad.

Lo cual conlleva al uso de la biomasa residual, tales como el orujo lavado de uva proveniente de las 957.573 hectáreas cultivadas de uva al 31 de julio de 2013 en España elaborado por Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente por la encuesta sobre superficies y rendimientos de cultivos de España[1], que actualmente se constituyen en un problema serio de disposición final de residuos sólidos, por lo que surge el interés por el aprovechamiento energético de un recurso renovable potencialmente utilizable.

La biomasa es considerada como fuente alterna de energía. Entre las ventajas que representa la utilización de la biomasa se encuentra el aprovechamiento de materiales considerados como residuos sin utilidad alguna, baja emisión de CO<sub>2</sub>, compuestos nitrogenados y compuestos sulfurados al ser utilizado como combustible, materia prima de bajo costo, recurso renovable y cuya utilización disminuye la dependencia de combustibles fósiles.

La transformación de la biomasa en energía aprovechable puede llevarse a cabo por medio de procesos bioquímicos y termoquímicos entre los cuales se encuentran la gasificación la cual es la conversión de la biomasa en un combustible gaseoso mediante el uso de un agente gasificante que puede ser aire, oxígeno, usados en cantidades inferiores al estequiométrico para la combustión, y/o vapor de agua. La composición del gas depende del tipo de reactor (lecho fijo, lecho fluidizado, o lecho arrastrado), de las condiciones de operación como temperatura, presión, y cantidad de agente gasificante. Los gases obtenidos en la gasificación se pueden transformar vía síntesis Fischer-Tropsch (FT) para producir combustibles líquidos para el sector transporte. Otra alternativa de uso del gas de síntesis es la producción de metanol para diversas aplicaciones desde combustible hasta materia prima en la industria química incluyendo la producción de biodiesel.

El objetivo de esta tesis doctoral presenta los diferentes aspectos que motivaron la oportunidad de investigar y mejorar las características de gasificación en lecho arrastrado empleado aire y vapor de agua en los residuos de la uva, tales como el orujo lavado de uva, ya que además de posibilitar el aprovechamiento en forma directa (p.e. en la producción de energía térmica), representa una tecnología limpia que proporciona un gas combustible con el poder calorífico necesario para alimentar motores de combustión interna, o producción de gas de síntesis, a partir del cual se pueda obtener biometanol, bioetanol o biohidrógeno.



Para ello, se evaluará el efecto de la adición de vapor de agua al aire como agente gasificante en la gasificación de flujo arrastrado, el contenido de vapor de la mezcla de gasificación entre 0 % (gasificación de aire) a 100 % en peso (gasificación de vapor), y se ha comparado en relación constante biomasa/agente gasificante (F) y el cociente de biomasa/oxígeno (F'). El efecto de la temperatura también se ha estudiado tanto para la gasificación de aire y de aire - vapor. El rendimiento del proceso de gasificación se ha evaluado a través de algunos parámetros de caracterización, tales como la composición de los gases productos, su valor de calentamiento, rendimiento de gas, la eficiencia de gas frío, la conversión de combustible, la distribución del producto, y las relaciones características del gas producto. Los resultados obtenidos muestran que existe un intervalo óptimo en el contenido de vapor del agente gasificante (encontrado para las mezclas de aire - vapor que contienen 40-70 % en peso de vapor) para los que existe un compromiso entre la calidad, la producción, la conversión del combustible y se alcanza la eficiencia máxima de gasificación. En general, la adición de vapor de agua resultó positiva para el rendimiento del proceso, ya que la calidad del gas pobre se mejora. En particular, con la eliminación de los efectos de la dilución de  $N_2$  del aire, y se aumenta el contenido de  $H_2$  y de  $CH_4$  con la adición de vapor, mientras que hay un máximo en la producción de CO. Por otro lado, un aumento en la temperatura de funcionamiento tiene diferentes efectos, dependiendo del agente gasificante utilizado. Por lo tanto, una temperatura más alta aumenta el contenido de CO y  $H_2$  en el gas producto para la gasificación de aire, mientras que la gasificación de aire - vapor conduce a un aumento en la producción de  $H_2$  a temperaturas más altas, así como un aumento en el contenido de  $CH_4$ , adicionalmente se observa una marcada influencia de la temperatura de gasificación sobre la eficiencia energética y exergética del proceso de gasificación.

# INTRODUCCIÓN

# Índice Detallado

	Contenido	Pág.
I.	JUSTIFICACIÓN	3
II.	ANTECEDENTES	6
III.	OBJETIVOS	7
IV.	METODOLOGÍA	8
V.	ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	8
VI.	REFERENCIAS	9

## I. JUSTIFICACIÓN

Actualmente el crecimiento económico, se relaciona con el consumo de energía, y a su vez con la prosperidad social, por ende, la preocupación mundial sobre el panorama energético actual exterioriza una serie de retos a nivel global que es necesario enfrentar de manera urgente, tal como lo evidencia la Agencia Internacional de la Energía, que al 2030 el requerimiento energético proveniente de países en desarrollo sea de un 74%, como China o India [2]. Y a su vez la demanda energética de Europa aumentara al 2030 en un 60%, por lo que se podrían desencadenar situaciones de conflicto y competencia entre países para asegurar el suministro energético, ocasionando que la dependencia en el suministro de energía (principalmente, combustibles fósiles como el petróleo o el gas natural) se estima que aumentará hasta un 70% en los próximos 20-30 años [3]. Además, con frecuencia, los países exportadores de gas y petróleo se encuentran concentrados geográficamente en zonas que sufren de inestabilidades políticas y sociales, lo cual aumenta aún más la vulnerabilidad del sistema energético frente a posibles interrupciones de suministro.

Además, la necesidad urgente de medidas para mitigar los efectos al ambiente causado por el exceso en el consumo de energía; especialmente, para disminuir los efectos del cambio climático (Reducción de emisiones tal como se decreta en el protocolo de Kyoto), por lo cual la comunidad Europea dentro de su política de desarrollo energético traza un objetivo general para lograr un suministro de energía segura, competitiva, sostenible y de calidad. Centrado en cuatro (4) áreas: la gestión de la demanda y del suministro externo, una mayor eficiencia en el uso de la energía, y la diversificación de los recursos energéticos europeos [4].

Uno de los puntos clave presentados en la estrategia energética europea son los objetivos "20-20-20" presentes en la Directiva europea 2009/28/CE, que establecen para 2020 son reducción del 20% en la emisión de gases que generen efecto invernadero, incrementar el 20% en la eficiencia energética y un desarrollo del 20% en el uso de las energías renovables en la demanda de energía comunitaria. En efecto, las energías renovables juegan un papel clave en el cambio del modelo energético, ya que contribuyen a la diversificación de recursos, al tiempo que fomentan el desarrollo socioeconómico mediante la creación de empleo y el liderazgo tecnológico, y ayudan a la preservación del ambiente [3][4][5], por ende, la biomasa se perfila como una de las opciones más prometedoras, ya que se trata de un recurso renovable y abundante (se considera la tercera fuente de energía más abundante, tras el carbón y el petróleo) y geográficamente extendido [6][7]. Además, su uso como recurso energético implica una serie de beneficios ambientales, sociales y económicos.

Por lo cual, al 2005 se dio un plan de acción que permitía incentivar el uso de la biomasa agrícola, forestal y residuos para la generación de biocombustibles y producción de energía[8]. A nivel europeo, la biomasa representa más de la mitad de las energías renovables, con 66.4 Mtep (Millones de toneladas equivalentes de petróleo) producidos en 2007, si bien las previsiones indican que están lejos de cumplirse los objetivos establecidos en el plan de acción sobre la biomasa (150

Mtep para 2010, incluyendo biomasa sólida, biogás y biocarburantes). Una de las causas por las que no se van a cumplir dichos objetivos radica en que la mitad del incremento de participación de la biomasa debería proceder de cultivos energéticos (10 Millones de hectáreas de tierras agrícolas comunitarias abandonadas), algo que no ha llegado a producirse. Por esta razón, si se desea cumplir los objetivos comunitarios en cuanto a producción de energía renovable a partir de biomasa, los cultivos energéticos deben desarrollarse plenamente [9], adicionalmente, se elaboró un plan de Energías Renovables (PER) 2005-2010, según el cual en 2010 el 12% del total de la energía consumida debe provenir de energías renovables. Asimismo, el Plan de Acción 2008-2012 de la Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España (PAE4+) determina como parámetro básico el ahorro de energía primaria del 13.7% para 2012. El RD 661/2007, en sustitución del RD 436/2004, regula y sistematiza el régimen jurídico y económico de la producción de energía eléctrica, introduciendo algunos cambios (incrementos en la retribución, y a su vez diferenciada según el recurso, promoción de instalaciones pequeñas, exigencia de eficiencia energética mínima) con respecto a la legislación anterior. En particular, para instalaciones alimentadas con biomasa, se establecen unas primas de referencia y unos límites fijos superior e inferior para la suma del precio del mercado de referencia y la prima de referencia [10] [11][12].

El uso potencial de la biomasa en España se estima entre 13-17 Mtep [13]. Es por ello que ocupa un lugar destacado en el PER 2005-2010, con una contribución del 60.6% al total de energías renovables. En concreto, los objetivos para la biomasa se establecieron en 1849 MW para 2010 [10]. Sin embargo, si bien en 2007 la biomasa representó más del 52% de la producción de energía primaria con renovables, lo cierto es que el nivel de cumplimiento de los objetivos para la biomasa se encontraba al 44%, proporción que se reduce aún más para la biomasa con fines eléctricos (11% del objetivo) y biocarburantes (21% del objetivo). Así, en 2007 sólo se produjeron a partir de biomasa 396 MW (un 0.7 %) de la producción eléctrica total. Estas cifras son una indicación de que aún se requiere un gran esfuerzo para lograr el despegue de la utilización de biomasa con fines energéticos. En particular, al igual que a nivel europeo, es necesario el desarrollo urgente de cultivos energéticos, en especial de especies no destinadas a la producción de alimentos que se adapten a las características climatológicas de cada zona [9], por lo cual, Castilla-La Mancha es una de las regiones líderes en la producción de energías renovables, especialmente energía eólica y solar [14][15]. Sin embargo, el uso de biomasa con fines energéticos aún precisa de un impulso definitivo, ya que a pesar de su elevado potencial en cuanto a producción de residuos agrícolas, forestales e industriales (debido principalmente a su amplio territorio y a su papel tradicional como región agrícola y rural), tan sólo el 2.1% de la energía total producida, un 0.79% de la producción de energía eléctrica y un 0.73% del consumo regional total provinieron de biomasa en 2007 [16]. En 2008, sólo se instalaron en la región 41 MW de los 120 MW establecidos en el PER 2005-2010 [17].

Dentro del aprovechamiento energético de la biomasa, la gasificación consiste en la conversión por oxidación parcial a elevada temperatura de un combustible carbonoso en un gas con energía útil [18], siendo una de las tecnologías que están recibiendo mayor interés por parte de investigadores, ya que permite la instalación de pequeñas plantas gasificador-motor en el sitio de generación, reduciendo de esta manera los costos de almacenamiento y transporte. Además, la tecnología de gasificación ayuda a recuperar la energía presente en materiales residuales (como biomasa residual o carbones de bajo rango), disminuyendo los costos de gestión y ambientales. La gasificación se considera, asimismo, una tecnología limpia y eficiente, ya que permite alcanzar mayores rendimientos eléctricos (30-32% usando motores de gas, frente al 22% logrado mediante un ciclo Rankine convencional) [19] sobre todo en el rango de bajas potencias, menores niveles de contaminantes tales como  $\text{NO}_x$  y  $\text{SO}_2$  (no sólo debido al bajo contenido en nitrógeno y azufre de la biomasa, sino a que además, debido a que el proceso se lleva a cabo en presencia de una atmósfera reductora, los contaminantes generados, principalmente  $\text{NH}_3$  y  $\text{H}_2\text{S}$ , pueden ser eliminados de una manera relativamente fácil del gas antes de su combustión), y la posibilidad de implementar métodos para la captura de  $\text{CO}_2$  [20][21][22][23]. Sin embargo, la gasificación de biomasa debe superar algunas barreras tanto técnicas como económicas antes de lograr su implantación a nivel comercial, tales como la eliminación y tratamiento de partículas y alquitranes, la producción, logística de suministro y pretratamiento de biomasa, la valorización de subproductos, la implementación a gran escala, y aspectos relacionados con la salud, seguridad y medioambiente.

Es por ello que los gasificadores de lecho arrastrado (entrained flow gasifiers) se perfilan como una opción interesante debido a su disponibilidad comercial a gran escala, a su flexibilidad de alimentación y su elevada eficiencia potencial para la producción de gas de síntesis [21]. Durante años se ha empleado para la producción de electricidad, carburantes y productos químicos a partir de carbón, fuel-oíl y gas natural. En el caso de emplear biomasa, se considera que es el tipo de gasificador más apropiado para la producción de biocarburos de segunda generación BTL [24]. Por otra parte, debido a las elevadas temperaturas de operación, los niveles de alquitranes generados en el proceso son muy bajos (si bien esto genera dificultades en cuanto a los materiales de construcción). Sin embargo, en la actualidad las instalaciones comerciales de gasificación en lecho arrastrado emplean en su mayoría carbón o combustibles líquidos, es decir, existe poca experiencia con biomasa en gasificadores de lecho arrastrado. Por lo tanto, una alternativa interesante sería el uso de biomasa en gasificadores de lecho arrastrado convencionales para carbón. Para ello, se han sugerido distintas opciones, tales como la pulverización (a tamaños del orden de 100 micrómetros), o la torrefacción (tratamiento térmico suave que mejora las propiedades del material). Sin embargo, el triturado implica un elevado costo de pretratamiento (que puede incluso alcanzar el 10% de la energía contenida en el combustible, de tal manera que se ha afirmado que actualmente no existe un método de reducción de tamaño que opere de manera económica sobre biomasa fibrosa. Además, la naturaleza corrosiva de las cenizas fundidas de biomasa afecta

negativamente a los materiales refractarios. Estas limitaciones hacen que los gasificadores de lecho arrastrado para biomasa sean aun comercialmente poco atractivos [21]. No obstante, se ha planteado la idea de poder utilizar biomasa a mayores tamaños, debido a la elevada reactividad de la biomasa con respecto al carbón, y por tanto, su mayor conversión. Esto no sólo implicaría reducir costos de pretratamiento de combustible, sino que permitiría la posibilidad de emplear sistemas de alimentación disponible y asequible, tales como los de tipo tornillo. Por lo tanto, la consolidación de la gasificación de biomasa como una tecnología viable y eficiente requiere aún solucionar dificultades técnicas y económicas. En concreto, se hace necesario optimizar las condiciones de operación en un gasificador de lecho arrastrado, para lo cual se requiere hacer un estudio global del efecto de dichas condiciones sobre el proceso de gasificación.

## II. ANTECEDENTES

El presente trabajo se enmarca dentro de la línea de investigación de conversión de energía que desempeña el grupo de investigación de Uso Racional de la Energía y Preservación del Medio Ambiente (UREMA) de la Universidad del Norte.

En concreto, el trabajo realizado en dicha línea de investigación ha dado lugar a los siguientes trabajos académicos previos:

### Tesis de maestrías

- Producción de gas de síntesis a partir de la gasificación de residuos agroindustriales de palma. Modelado y Simulación. G. Cujía. (2012)
- Caracterización del proceso de gasificación en lecho fijo para el residuo agroindustrial cuesco de palma africana en la región Caribe. A. Verdeza. (2013)

### Ponencias internacionales

- Modeling and Simulation of Syngas produced from biogas Gasification Enriched with solar hydrogen. G. Cujía, A. Mercado, J. Mendoza.
- Gasification of grapevine prune. Waste using entrained flow reactor: characterization of gas products and considerations about conditioning. A.J. Bula, J.J. Hernández, G.A. Almansa, G. San Miguel.
- Predicción del Rendimiento de gasificadores de cascarilla de arroz en Lecho Fluidizado para sistemas de generación de energía. A.J. Bula.
- Gasificación de biomasa como fuente primaria para la generación de energía. L.A. Corredor Martínez.
- Estudio del Proceso fluidodinámico de gasificación. G.J. Cujía Quintero.
- Gasificación de biomasa como fuente primaria para la generación simultanea de electricidad y calor en sectores rurales y agroindustriales. D.H. Pino Melgarejo, L. Corredor.

### Artículos publicados

- Gasification of biomass waste in an entrained flow gasifier: Effect of the particle size and the residence time. J.J. Hernández, G.A. Almansa, A.J. Bula.
- Potencial obtención de gas de síntesis para la producción de metanol a partir de la gasificación de residuos de palma africana. G. Cujía, A.J. Bula.
- Gasification of grapevine pruning waste in an entrained-flow reactor: Gas product, Energy efficiency and Gas conditioning alternatives. A.J. Bula, J.J. Hernández, G.A. Almansa, G. San Miguel.
- Análisis Exergético de la gasificación de biomasa. A.J. Bula, R. Gómez, L.A. Corredor Martínez, J. Mendoza.
- Syngas for methanol production from Palm Oil Biomass Residues Gasification. A.J. Bula, M. San Juan Mejía, J. Mendoza, R. Gómez.

### Proyectos

- Desarrollo de un sistema de cogeneración de baja potencia accionado con un gasificador de cascarilla de arroz.
- Desarrollo de Integración Tecnológica de Recursos Energéticos Renovables en Sistemas Productivos Agrícolas y Agroindustriales Montería, Córdoba, Caribe BPIN No. 2012000100026, financiado por SGR.

## III. OBJETIVO

El presente trabajo de investigación pretende continuar con el estudio experimental del proceso de gasificación de biomasa que se ha venido llevando a cabo en el Grupo de Combustibles y Motores de la Universidad de Castilla-La Mancha y a su vez se ha iniciado en el grupo de investigación de Uso Racional de la Energía y Preservación del Medio Ambiente (UREMA) de la Universidad del Norte, por lo cual, se ha analizado el efecto de la adición de vapor como agente gasificante a través de una caracterización en su efecto para el tiempo de residencia, el dosado relativo y la temperatura. Adicionalmente, se estudiaron los efectos de la temperatura y presión en la eficiencia energética y exergética del a Gasificación.

El objetivo último es la determinación de las condiciones óptimas de operación de un gasificador de lecho arrastrado para lograr la producción de un gas con elevado poder calorífico, en un proceso con un alto rendimiento y un elevado nivel de conversión del combustible. Los resultados obtenidos podrían contribuir a la adquisición de conocimiento que permita la consolidación de la gasificación en lecho arrastrado como una tecnología viable y eficiente para su utilización con biomasa como combustible. De esta manera, se contribuiría al impulso y desarrollo de este recurso renovable con un enorme potencial y que puede generar nuevas posibilidades de lograr un desarrollo socioeconómico y ambiental sostenible.



#### **IV. METODOLOGÍA**

Para la realización de este trabajo de investigación, y con el fin de lograr los objetivos planteados en el apartado anterior, se han llevado a cabo las siguientes tareas:

- Se ha realizado un estudio experimental de gasificación de biomasa en lecho arrastrado, en el que se han evaluado diferentes parámetros de operación, como se listan a continuación:
  - o Efecto del porcentaje de vapor añadido.
  - o Efecto de la temperatura de gasificación.
  - o Efecto del tiempo de residencia.
  - o Efecto del dosado relativo de gasificación.
  - o Efecto de la relación vapor / biomasa.
- Se ha realizado una evaluación exergética y energética teórica de la biomasa a diferentes presiones y temperaturas:

#### **V. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO**

El presente trabajo se estructura de la siguiente manera: tras la introducción presentada en este aparte, el capítulo 1 presenta las generalidades de la biomasa y el capítulo 2 recoge una revisión bibliográfica sobre los procesos de la gasificación de biomasa: etapas del proceso, factores de influencia, aplicaciones del gas producto, contaminantes presentes en el gas, métodos de limpieza del mismo y la modelación de procesos de gasificación, en el capítulo 3 se realiza una revisión del modelado termoquímico y exergético de la gasificación.

En el capítulo 4 se hace una descripción de la planta piloto en la que se efectuaron los ensayos de gasificación, así como de los equipos disponibles para la preparación de combustible, gasificación del mismo, limpieza de gas, muestreo de subproductos del proceso y análisis de la composición del gas. Y los planes de ensayo diseñados para el estudio de las variables de operación sobre el proceso, así como los parámetros empleados para la caracterización. Por lo cual, el capítulo 5. Presenta los resultados obtenidos en los ensayos efectuados, junto con su justificación, Por su parte, el capítulo 6 recoge las conclusiones obtenidas, así como algunos trabajos futuros en el área de gasificación de biomasa. Por último el capítulo 7 recopila las publicaciones a que ha dado lugar este trabajo como artículos científicos y ponencias nacionales e internacionales durante el estudio doctoral.

## VI. REFERENCIAS

- [1] Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Superficies y producción (2013) <http://www.magrama.gob.es/es/agricultura/temas/producciones-agricolas/vitivinicultura/#para2>
- [2] International Energy Agency. (s.f.). *World Energy Outlook 2007*. Obtenido de <http://www.iea.org/publications/index.asp>
- [3] Commission of the European Communities. (s.f.). *Green paper – A European strategy for sustainable, competitive and secure energy*. Obtenido de COM (2006) 105 final: [http://ec.europa.eu/energy/green-paper-energy/doc/2006\\_03\\_08\\_gp\\_document\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/energy/green-paper-energy/doc/2006_03_08_gp_document_en.pdf)
- [4] World Energy Council. (2008). *Europe's vulnerability to energy crises*. Obtenido de <http://www.worldenergy.org/publications/>
- [5] Commission of the European Communities. (s.f.). *An energy policy for Europe*. Obtenido de COM (2007) 1 final: [http://ec.europa.eu/energy/energy\\_policy/doc/01\\_energy\\_policy\\_for\\_europe\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/energy/energy_policy/doc/01_energy_policy_for_europe_en.pdf)
- [6] *Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de abril de 2009*. (2009 de Junio de 5). Obtenido de Diario Oficial de la Unión Europea: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:ES:PDF>
- [7] IDAE, Ministerio de Industria, Comercio y Turismo, Gobierno de España. (2007). *Energía de la biomasa. Manuales de Energías Renovables*.
- [8] Milne, T.A., Elam, C., & Evans, R. (2002). *Hydrogen from biomass*. Obtenido de State of art and research challenges. Report IEA/H2/TR-02/001: [http://www.ieahia.org/pdfs/hydrogen\\_biomass.pdf](http://www.ieahia.org/pdfs/hydrogen_biomass.pdf)
- [9] Comisión de las Comunidades Europeas. (s.f.). *Plan de Acción sobre la Biomasa*. Obtenido de COM (2005) 628 final: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2005:0628:FIN:ES:PDF>
- [10] Fernández, J. (2009). Potencial agroenergético de la agricultura española. *Ambienta: La revista del Ministerio de Medio Ambiente*, 35-46.
- [11] Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, Gobierno de España. (2005). *Plan de Energías Renovables 2005-2010*. Obtenido de [www.idae.es](http://www.idae.es)
- [12] IDAE, Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, Gobierno de España. (2007 ). *E4, Plan de Acción 2008-2012*. Obtenido de <http://www.mityc.es/es-ES/Documentacion/DocumInteres/plan20082012.pdf>
- [13] IDAE, Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, Gobierno de España. (s.f.). *Biomasa: Producción eléctrica y cogeneración (2007)*.
- [14] Agencia de la Energía de Castilla-La Mancha (AGECAM). (s.f.). Anuario estadístico energético 2007. Obtenido de [www.agecam.es](http://www.agecam.es)
- [15] Agencia de la Energía de Castilla-La Mancha (AGECAM). (s.f.). *Estadística energética de Castilla-La Mancha 2007*. Obtenido de [http://www.agecam.es/portal/lang\\_es-ES/tabid\\_9462/default.aspx](http://www.agecam.es/portal/lang_es-ES/tabid_9462/default.aspx)
- [16] Cuesta, A. (2008). Escenario de la biomasa en Castilla-La Mancha. . *Revista Técnica de Medio Ambiente*, 44-51.
- [17] IDAE, Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, Gobierno de España. (s.f.). *Memorial anual 2007*.
- [18] Higman, C., & van der Burgt, M. (2008). *Gasification* (Segunda ed.). GPP, Elsevier.
- [19] IDAE, Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, Gobierno de España. (2007). *Biomasa: Gasificación*. Obtenido de [www.idae.es](http://www.idae.es)
- [20] Lapuerta, M., Hernández, J., Pazo, A., & López, J. (2008). Gasification and co-gasification of biomass wastes: effect of the biomass origin and the gasifier operating conditions. *Fuel Processing Technology* 89, 828-837.
- [21] Serrano, C., Hernández, J., Mandilas, C., Sheppard, C., & Woolley, R. (2008). Laminar burning behaviour of biomass gasification-derived producer gas. *International Journal of Hydrogen Energy* 33, 851-862.

- [22] Lapuerta, M., Hernández, J., & Rodríguez, J. (2007). Comparison between the kinetics of devolatilisation of forestry and agricultural wastes from the middle-south regions of Spain. *Biomass and Bioenergy* 31, 13-19.
- [23] Gasification Technologies Council. (2008). *Gasification. Redefining clean energy*. Obtenido de [www.gasification.org](http://www.gasification.org)
- [24] van der Drift, A., Boerrigter, H., Coda, B., Cieplik, M., & Hemmes, K. (2004). Entrained flow gasification of biomass. Ash behaviour, feeding issues, and system analyses. <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2004/c04039.pdf>:ECN-C04-039

# **CAPÍTULO I**

# **GENERALIDADES DE LA**

# **BIOMASA.**

# Índice Detallado

	Contenido	Pág.
1.1.	LA BIOMASA	13
1.2.	TIPOS DE BIOMASA	13
1.2.1.	Maíz	14
1.2.1.1.	Residuos del maíz	15
1.2.2.	Arroz	15
1.2.2.1.	Residuos del arroz	15
1.2.3.	La caña de azúcar	17
1.2.3.1.	Residuos de la caña de azúcar	17
1.2.4.	La uva	18
1.2.4.1.	Residuos de la uva	18
1.3.	REFERENCIAS	20

	Listado de figuras	Pág.
Figura 1.1.	Origen de la biomasa [1][4]	13
Figura 1.2.	El maíz [7]	15
Figura 1.3.	El arroz [10]	15
Figura 1.4.	Distribución de cultivos del arroz [6].	16
Figura 1.5.	La caña de azúcar [13]	17
Figura 1.6.	Distribución de los cultivos de la caña de azúcar en Colombia [6]	17
Figura 1.7.	La uva [3]	18
Figura 1.8.	Proceso de fabricación del vino	18
Figura 1.9.	Orujo lavado de Uva	19

## 1.1. LA BIOMASA

La biomasa se define como toda sustancia orgánica renovable de origen tanto animal como vegetal que debe su poder calorífico al sol. Su formación se debe al proceso de la fotosíntesis en el caso vegetal, y el reino animal incorpora, transforma y modifica dicha energía (Figura 1.1). En este proceso de transformación de la materia orgánica, se generan subproductos que no tienen valor para la cadena nutritiva o no sirven para la fabricación de productos de mercado, pero si se pueden emplear como combustible en diferentes procesos de transformación energética[1], lo cual implica una serie de beneficios tales como:

- Reducción de la dependencia energética de combustibles fósiles, así como de la vulnerabilidad frente a posibles interrupciones de suministro de energía, que amenazan la economía y a la seguridad energética de los Estados.
- Creación de empleo: desarrollo de industrias de procesamiento y distribución en comunidades rurales.
- Refuerzo de los mercados agrícolas, así como nuevos usos para tierras marginales, en el caso de cultivos energéticos.
- Reducción en las emisiones netas de CO<sub>2</sub>, debido al equilibrio entre la liberación durante la combustión y el CO<sub>2</sub> fijado durante la fotosíntesis de las plantas. La combinación de reducción mediante biocombustibles y producción eléctrica con biomasa puede suponer una reducción de más del 100% de la emisión neta de CO<sub>2</sub>.
- Reducción de emisiones de SO<sub>2</sub>, debido al bajo contenido de azufre de la biomasa.

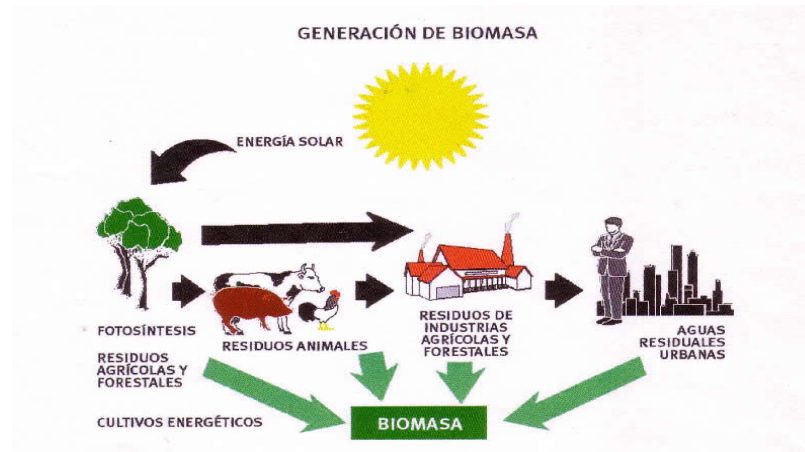


Figura 1.1 Origen de la biomasa [1][4].

## 1.2. TIPOS DE BIOMASA

Los diferentes tipos de biomasa que pueden ser utilizados como recurso energético, se agrupan en:

- **Biomasa natural:** Es la que se produce espontáneamente en la naturaleza sin ningún tipo de intervención humana.
- **Los vertimientos denominados biodegradables:** aguas residuales y residuos ganaderos.
- **Cultivos Energéticos:** Esta biomasa se obtiene a partir de siembras, que se generan con la única finalidad de producir biomasa transformable en combustible. Estos cultivos los podemos dividir en:
  - Cultivos ya existentes como los cereales, oleaginosas, etc.
  - Lignocelulósicos forestales (chopo, sauces, eucaliptos, etc.).
  - Lignocelulósicos herbáceos como el cardo *Cynara cardunculus*.
- **Biocombustibles:** Aunque su origen parte de la transformación de la biomasa residual seca y húmeda o en los cultivos energéticos, por sus características especiales este tipo de biomasa se encuadra en una clasificación distinta a las anteriores.
- **Biomasa residual (seca y húmeda):** Son los residuos que se generan debido a las actividades que realizan las agroindustrias y que todavía pueden ser utilizados y considerados subproductos. Los más representativos son:
  - Los residuos del cultivo y procesamiento del aceite de oliva (orujo, orujillo, alpechín, huesos).
  - Los residuos del cultivo y procesamiento de la uva (orujo, raspones, sarmiento, entre otros).
  - Elaboración de frutos secos (cascaras, pieles).
  - Aserraderos de pino (serrines, virutas, corteza, costeros, recortes).

En Colombia, la biomasa residual presenta una alta disponibilidad debido a la extensiva práctica de las actividades agropecuarias. De hecho, en el 2006 se estimó que cerca del 44,7% del territorio continental del país estaba utilizado para actividades con este fin [6]. Cultivos transitorios y estacionarios, de donde se destacan el maíz, el arroz, la caña de azúcar y pañalera y el café formaron parte de las 4'058.470 hectáreas dedicadas a estas actividades en el año 2005 [6]. Aunque a continuación se describen alguna de las biomásas residuales presentes en el país, esta investigación se realizó con biomasa residual en Europa procedente de la extracción del vino que se describe igualmente al final del capítulo.

### 1.2.1. Maíz

El maíz es un cereal característico de América; constituye uno de las principales fuentes de sustento para el ser humano ya que tiene usos en la producción de alimentos tanto para animales como seres humanos, aceites y proteínas. Ver figura 1.2



Figura 1.2. El maíz [7]

#### **1.2.1.1. Residuos del maíz**

El cultivo de maíz, en general, produce una gran cantidad de biomasa. Dependiendo de la naturaleza del cultivo (maíz de grano o maíz de choclo) son los tipos de biomásas generados, siendo el primero aquél que mayor cantidad de residuos genera. Estos residuos son obtenidos durante la recolección del maíz, que puede ser por acción manual o mediante una ensiladora. Esta última proporciona residuos triturados que tienen como fin alimento para el ganado[8].

#### **1.2.2. Arroz**

El arroz es, como el maíz, un cereal que representa una de las bases de la alimentación a nivel mundial. Solo en Colombia en el 2013 se registró un consumo per cápita de 41.6 kg [9], lo que indica su extenso consumo. Ver Figura 1.3



Figura 1.3. El arroz [10]

#### **1.2.2.1. Residuos del arroz**

El residuo principal del cultivo de arroz es la cascarilla de arroz que se genera luego del proceso de molienda del mismo. Se estima que por cada 5 toneladas de arroz, se obtiene 1 de cascarilla[11]. En Colombia, es una biomasa que presenta



una alta disponibilidad, en la región Caribe, Andina y Pacífica es donde se presentan las mayores producciones de residuo, teniendo al departamento del Tolima como principal productora de residuos de cultivo de arroz [6]. La figura 1.4 muestra una tabla donde se detallan el aporte de residuos de cultivo de arroz por alguno de los departamentos del país.

Departamento	Área sembrada [ha]	Producción	Cantidad de residuo	Potencial energético
		[t producto/año]	[t/año]	[TJ/año]
Antioquia	21.635	54.875	139.931	620,00
Bolívar	33.374	125.250	319.388	1.415,13
Caquetá	1.268	1.539	3.924	17,39
Cauca	1.446	5.352	13.648	60,47
Cesar	24.780	144.896	369.485	1.637,10
Córdoba	32.404	104.258	265.858	1.177,96
Cundinamarca	1.666	10.146	25.872	114,63
Chocó	11.946	21.565	54.991	243,65
Huila	30.258	214.038	545.797	2.418,30
La Guajira	2.750	13.480	34.374	152,3
Magdalena	2.563	12.806	32.655	144,69
Meta	65.456	353.516	901.466	3.994,19
Nariño	799	470	1.200	5,31
Norte de Santander	20.642	120.134	306.342	1.357,33
Santander	470	3.108	7.925	35,12
Sucre	41.505	184.618	470.776	2.085,90
Tolima	99.880	763.109	1.945.928	8.621,97
Valle del Cauca	5.970	40.031	102.079	452,29
Arauca	3.646	14.190	36.185	160,33
Casanare	51.189	274.409	699.743	3.100,40
Putumayo	1.010	1.238	3.157	13,99
Amazonas	28	38	97	0,43
Guaviare	676	548	1.397	6,19
Vaupés	60	45	114	0,51
Vichada	22	30	77	0,34
<b>TOTAL</b>	<b>455.444</b>	<b>2.463.689</b>	<b>6.282.407</b>	<b>27.835,94</b>

Figura 1.4. Distribución de cultivos del arroz [6].

### 1.2.3. La caña de azúcar

Es una especie de planta originaria del continente asiático que se expandió, primero a Europa a través de los árabes en territorio español y estos la introdujeron en el continente americano debido a las favorables condiciones de cultivos que se presentan en este territorio. Posee la característica de almacenar sacarosa disuelta en savia, a través del secado y posteriores procesos de esta sustancia se obtiene el azúcar[12] Ver Figura 1.5



Figura 1.5. La caña de azúcar [13]

#### 1.2.3.1. Residuos de la caña de azúcar

La caña de azúcar es una planta que además de tener usos alimenticios, posee usos en cuanto a la producción energética. Precisamente, existen cultivos dedicados a producir caña de azúcar para la generación de energía. No es de extrañar entonces que los residuos de caña sean una biomasa altamente utilizada para la producción de energía sin tener en cuenta que el cultivo de caña de azúcar es uno de los más extensivos en el país. El bagazo, es el residuo derivado de estos tipos de cultivos, el cual presenta un poder calorífico inferior de 4,456 kcal/kg. La figura 1.6 muestra la distribución de los cultivos de la caña de azúcar en Colombia junto con la generación de residuos y el potencial energético respectivo.

Departamento	Área sembrada [ha]	Producción	Cantidad de residuo	Potencial energético
		[t producto/año]	[t/año]	[TJ/año]
<b>Caldas</b>	2.625	32.812	194.903	1.487,74
<b>Cauca</b>	34.486	390.142	2.317.443	17.689,55
<b>Cesar</b>	1.734	10.924	64.889	495,31
<b>Norte de Santander</b>	969	10.420	61.895	472,46
<b>Risaralda</b>	2.719	38.357	227.841	1.739,16
<b>Valle del Cauca</b>	168.033	2.132.596	12.667.620	96.694,67
<b>TOTAL</b>	<b>210.566</b>	<b>2.615.251</b>	<b>15.534.591</b>	<b>118.578,88</b>

Figura 1.6. Distribución de los cultivos de la caña de azúcar en Colombia [6]

### 1.2.4. La uva

La uva (*Vitis vinifera*) es una fruta obtenida de la vid y es cultivada principalmente para la producción de mostos, vinos y vinagres (Figura 1.7), crecen en racimos de entre 6 y 300 uvas, estas pueden ser negras, moradas, blancas, amarillas, doradas, púrpura, rosadas, marrones o anaranjadas [2].



Figura 1.7 La uva [3]

#### 1.2.4.1. Residuos de la uva

A continuación se presenta de manera esquemática el proceso de fabricación del vino (Figura 1.8), en donde se obtienen los siguientes subproductos o residuos que se pueden utilizar con fines energéticos tales como el orujo lavado de uva y vinazas.

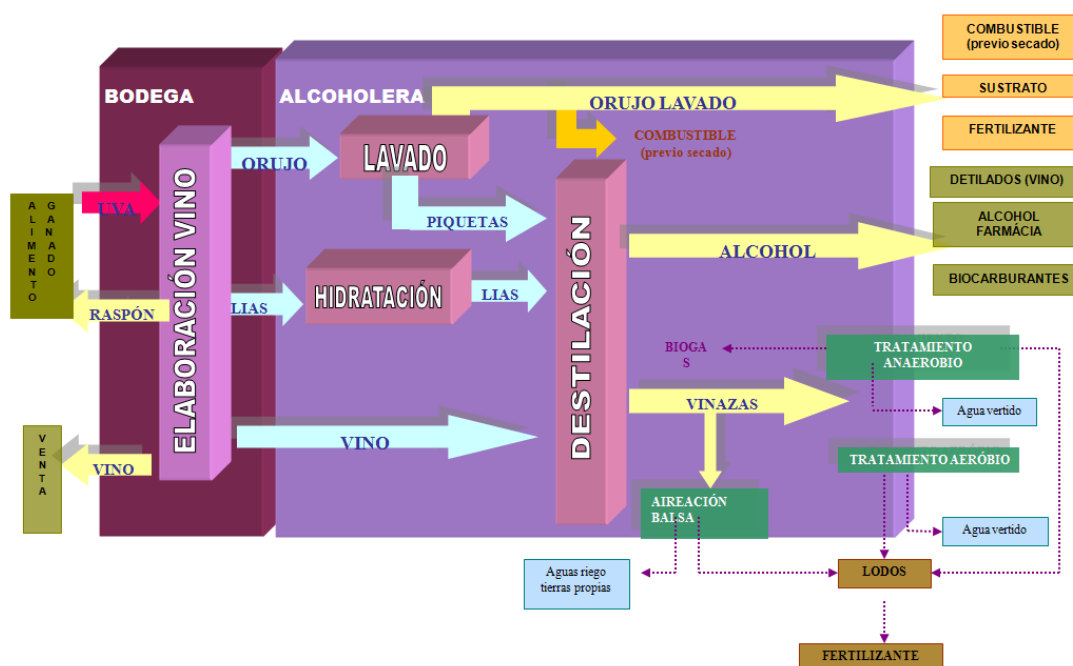


Figura 1.8 Proceso de fabricación del vino

**El orujo lavado de uva (orujo desalcoholizado, orujo agotado u orujillo de uva)** se obtiene a partir del orujo de uva (hollejos, resto de raspones y granilla) que se genera en las prensas de las bodegas (Figura 1.9). El orujo de uva (orujo fresco, orujo verde) se deposita en un tren de lavado compuesto por unas bandas que van desplazando el orujo a la vez que es atravesado (como duchado) por agua, arrastrando los alcoholes y azúcares contenidos en él. Las aguas cargadas de azúcares y alcohol se denominan piquetas y son las que más tarde se destilarán para obtener alcohol bruto[5]. La masa que queda tras este proceso de lavado es lo que se denomina orujo lavado de uva u orujo desalcoholizado u orujo agotado. Este orujo desalcoholizado tiene una humedad considerable, entre el 55% y 75% de humedad en base húmeda, pero suele ser secado en las propias alcoholeras quedándose con un 15% de humedad en base húmeda. Es un buen combustible y es ese fundamentalmente su destino[5].



Figura 1.9 Orujo lavado de Uva

### 1.3. REFERENCIAS

- [1] OPEXenergy Operación y Mantenimiento S.L. (s.f.). Biomasa. Obtenido de <http://opex-energy.com/biomasa/>
- [2] (s.f.). Obtenido de <http://todoplantas.blogspot.com/>: <http://todoplantas.blogspot.com/2008/12/uva.html>
- [3] Wikipedia. (s.f.). Vitis vinifera. Obtenido de [http://es.wikipedia.org/wiki/Vitis\\_vinifera](http://es.wikipedia.org/wiki/Vitis_vinifera)
- [4] ALVINESA ALCOHOLERA VINÍCOLA S.A. (s.f.). Obtenido de <http://www.alvinesa.com/inicio/?setlang=es>
- [5] Pazo, A. (2006). Estudio del potencial de biomasa residual en Castilla-La Mancha para su explotación en centrales termoeléctricas. Universidad de Castilla-La Mancha y Universidad Rey Juan Carlos.
- [6] Escalante Hernández, H., Orduz Parda, J., Zapata Lesmes, H., Cardona Ruiz, M. C., & Duarte Ortega, M. (2006). Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia.
- [7] (s.f.). Obtenido de <http://lpcdedios.wordpress.com/2013/11/14/maiz-y-sus-beneficios/>
- [8] Pasturas de América. (2014). Obtenido de <http://www.pasturasdeamerica.com/>: <http://www.pasturasdeamerica.com/utilizacion-forrajes/residuos-agricolas/maiz/>
- [9] Fedearroz. (2013). <http://www.fedearroz.com.co/>. Obtenido de <http://www.fedearroz.com.co/new/consumo.php>
- [10] (s.f.). Obtenido de <http://veganizando.wordpress.com/2013/11/01/tecnicas-de-cocina-como-cocer-arroz/>
- [11] Argos. (2013). Obtenido de <http://periodicoluzverde.com/>: <http://periodicoluzverde.com/la-cascarilla-de-arroz/>
- [12] Morales, J. (2014). InfoJardin. Obtenido de <http://www.infojardin.com/>: <http://fichas.infojardin.com/hortalizas-verduras/cana-azucar-dulce-canaduz-canamiel.htm>
- [13] (s.f.). Obtenido de <http://www.agronewscastillayleon.com/empiezan-los-ensayos-con-cana-de-azucar-transgenica-en-america-del-sur>

# **CAPÍTULO II PROCESOS DE GASIFICACIÓN DE LA BIOMASA.**

# Índice Detallado

	Contenido	Pág.
2.1.	LA GASIFICACIÓN DE BIOMASA	23
2.2.	PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN DE LA BIOMASA PARA SU APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO	23
2.2.1.	Pirólisis	23
2.2.2.	Combustión	24
2.2.3.	Gasificación	24
2.2.3.1.	Reacciones de gasificación	25
2.3.	TIPOS DE GASIFICADORES DE BIOMASA	27
2.3.1.	Gasificación en lecho fijo o móvil	28
2.3.2.	De lecho fluidizado	29
2.3.3.	De lecho arrastrado	29
2.4.	SUBPRODUCTOS DE LA GASIFICACIÓN	30
2.4.1.	Contaminantes líquidos: alquitranes	30
2.4.2.	Contaminantes sólidos	32
2.4.3.	Limpieza del gas después del gasificador	33
2.5.	REFERENCIAS	34
	<b>Listado de figuras</b>	<b>Pág.</b>
Figura 2.1.	Procesos de conversión de la biomasa [3]	24
Figura 2.2.	Clasificación del gas energético de acuerdo con el tipo de agente gasificante	25
Figura 2.3.	Constantes de equilibrio de las reacciones de gasificación frente a la temperatura	27
Figura 2.4	Tipos de gasificadores	28
Figura 2.5	Gasificador Updraft.	28
Figura 2.6	Gasificador Downdraft	29
Figura 2.7	a) Reactor de Lecho Fluidizado Burbujeante. b) Reactor de Lecho Fluidizado Circulante. [5]	29
Figura 2.8	Reactor de Lecho Arrastrado [5]	30
Figura 2.9	Sistema de recogida de muestreo según norma CEN/TS 15439 [13]	32
	<b>Listado de tablas</b>	<b>Pág.</b>
Tabla 2.1.	Reacciones de gasificación; <b>Error! No se encuentra el origen de la referencia.</b> [7][12]	26
Tabla 2.2.	Constantes de equilibrio de las principales reacciones de gasificación	27
Tabla 2.3.	Clasificación de los alquitranes[11]	31
Tabla 2.4.	Métodos de eliminación de contaminantes del gas producto	33



## 2.1. LA GASIFICACIÓN DE BIOMASA

La utilización de fuentes renovables de energía se están encaminando como una de las mejores herramientas hacia el desarrollo sostenible, por lo cual se han venido desarrollando nuevas técnicas para la obtención de combustibles a partir de la biomasa, dentro de las cuales, se encuentra la gasificación, siendo este un proceso termoquímico en el que un sustrato carbonoso (residuo orgánico) es transformado en un gas combustible, mediante una serie de reacciones que ocurren a una temperatura determinada en presencia de un agente gasificante (aire, oxígeno y/o vapor de agua).

Por otro lado, cabe resaltar la importancia de este proceso, debido a que brinda una solución racional de la disposición final de residuos agroindustriales y porque en las últimas décadas el uso indiscriminado de combustibles fósiles ha conducido a la humanidad a generar repercusiones negativas sobre la integridad del ecosistema. Así mismo, esta tecnología a futuro promete beneficiar al sector industrial y promover soluciones a problemáticas sociales como el desempleo.

## 2.2. PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN DE LA BIOMASA PARA SU APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO

La conversión de la biomasa se puede realizar por dos vías básicamente, la conversión por métodos biológicos los cuales se basan en la descomposición de la biomasa, mediante el uso de microorganismos con la presencia o ausencia de oxígeno, en este caso la fermentación alcohólica y la digestión anaerobia. Por otro lado se encuentra el procesamiento termoquímico de la biomasa lignocelulósica y existen tres métodos que se basan en la combustión directa, pirólisis y gasificación, de los cuales sus productos principales pueden ser gas, líquido, carbón vegetal y/o energía térmica (figura 2.1), dependiendo de la tecnología empleada [1].

### 2.2.1. Pirólisis

Degradación térmica (desvolatilización) del combustible en ausencia de agentes oxidantes con temperaturas entre 200-500 °C, obteniendo una mezcla de líquidos, gases y carbón vegetal, cuyas proporciones dependen del método utilizado. La temperatura, la presión, la tasa de calentamiento y el tiempo de reacción, pueden ser utilizados para determinar las proporciones y características de los productos, los cuales se pueden usar en una gran variedad de aplicaciones. El carbón puede ser utilizado para la producción de carbón activado, o como combustible en sistemas de combustión directa, p. Ej. Calderas. El gas puede ser empleado o en la generación de energía eléctrica y calor, o mediante síntesis para producir metanol. Los líquidos (alquitranes pesados), pueden ser utilizados como combustibles para motores de combustión interna alternativa, o en sistemas de combustión para generar energía eléctrica o térmica [2].



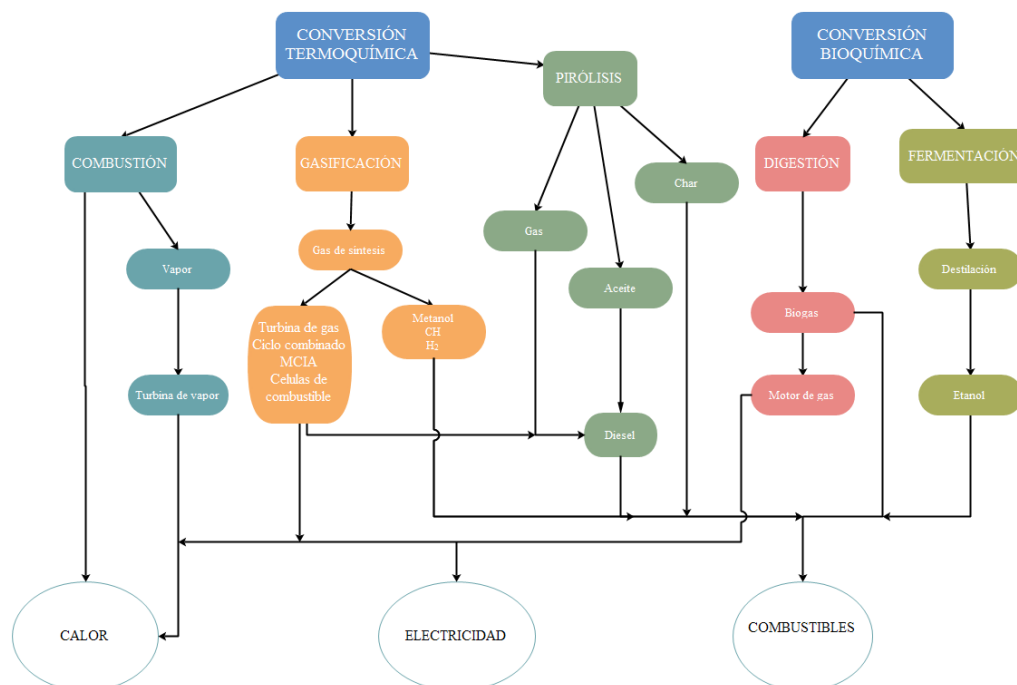


Figura 2. 1 Procesos de conversión de la biomasa [3]

## 2.2.2. Combustión

Es la oxidación completa de la biomasa, en el cual se produce por medio de la reacción gases, vapor de agua, cenizas y calor el cual es el producto principal de este proceso donde la energía en forma de calor es aprovechada para la producción de vapor, u otras aplicaciones domesticas o industriales, La combustión directa de la biomasa es el sistema más elemental y antiguo de recuperación energética de la misma. La combustión de biomasa puede caracterizarse mediante la siguiente reacción química [1]:

## 2.2.3. Gasificación

La gasificación de la biomasa puede definirse como el proceso mediante el cual la biomasa es degradada por reacciones térmicas en presencia de cantidades limitadas de agente oxidante (Oxidación Parcial-Pirolisis), para generar un producto gaseoso combustible compuesto principalmente por hidrógeno, monóxido de carbono, metano, dióxido de carbono, vapor de agua, nitrógeno y trazas de hidrocarburos pesados (Alquitranes) [2]. El agente gasificante es usualmente aire, aunque también hay otros procedimientos que utilizan vapor de agua, dióxido de carbono o una mezcla de estos, controlando el proceso con el objetivo de maximizar la producción de hidrógeno y monóxido de carbono. Es preferible que la biomasa a gasificar este seca y fragmentada con el objetivo de maximizar el rendimiento del proceso.

De otro lado, y a pesar de que la combustión del orujo lavado de uva actualmente representa grandes beneficios en la producción de vapor para procesos subsiguientes, en los últimos años la gasificación de biomasa vegetal se

ha venido convirtiendo en una importante alternativa para países del tercer mundo que dependen de combustibles fósiles como el carbón y el petróleo. Definida como la conversión de un combustible sólido a gas energético ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  y  $\text{CH}_4$ ) mediante la oxidación parcial a elevadas temperaturas, la gasificación representa una de las tecnologías más prometedoras a futuro, el gas energético se produce de manera controlada en un reactor donde el combustible sólido sufre transformaciones físicas y químicas que involucran etapas como el secado, la volatilización, la combustión y la gasificación propiamente dicha [1].

El poder calorífico del gas varía dependiendo del procedimiento adoptado en el proceso (figura 2.2), el cual tiene un valor en torno a 4-6 MJ/m<sup>3</sup>N si el agente gasificante es aire; 10 - 20 MJ/m<sup>3</sup>N si el proceso se realiza con oxígeno, y mayor a 30 MJ/m<sup>3</sup>N si se gasifica con hidrógeno[4]. El contenido energético del gas también se ve afectado por la composición de la biomasa, cuyo valor energético de un combustible sólido particular, depende de las propiedades químicas y físicas de las moléculas que lo constituyen.

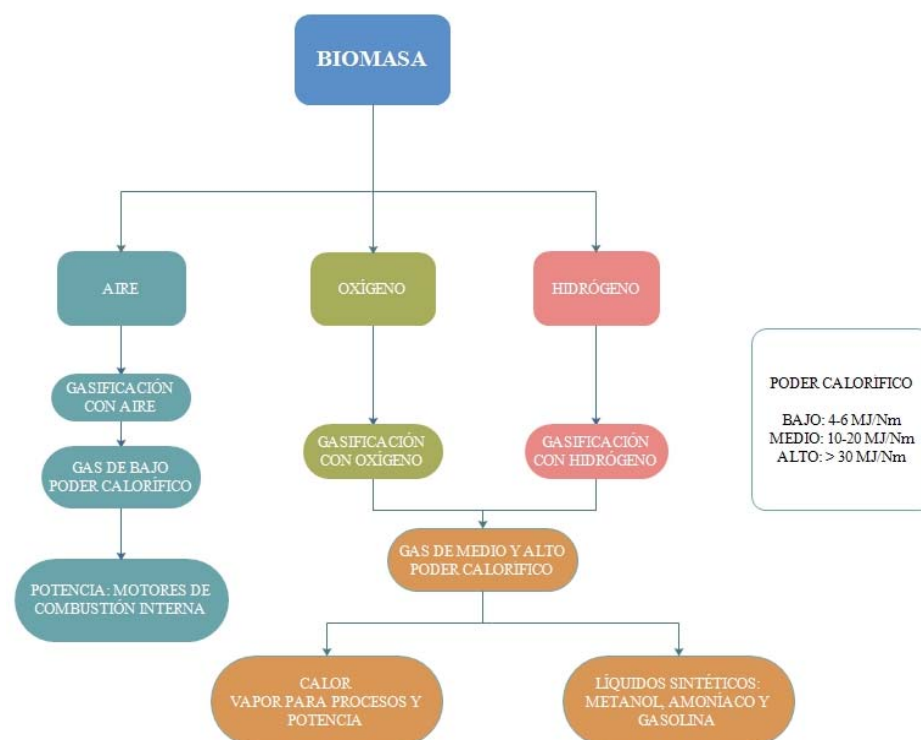


Figura 2. 2. Clasificación del gas energético de acuerdo con el tipo de agente gasificante

### 2.2.3.1. Reacciones de gasificación

Mediante la tabla 2.1, se evidencian las reacciones del proceso de gasificación, a la cual, la pirolisis o degradación térmica del combustible en ausencia de agentes oxidantes con temperaturas mayores a 200 °C y menores a 500 °C, para obtener los productos presentados en R. 2.1 y R. 2.2.

Tabla 2. 1 Reacciones de gasificación[7][12].

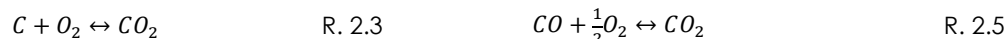
**Pirólisis**



**Craqueo secundario**



**Combustión**

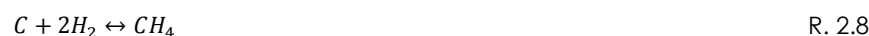


**Gasificación**

Reacción de Boudouard



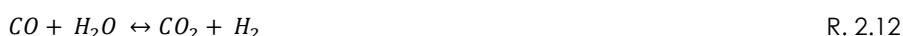
Hidrogasificación



Reformado con vapor de agua (agua-gas)



Water-gas shift (equilibrio CO-CO<sub>2</sub>)



Reformado de Metano



Adicionalmente al tener presencia de oxígeno se da una reducción o combustión como muestran las reacciones R. 2.3, R. 2.4, R. 2.5 y R. 2.6, las cuales proporcionan el calor necesario para secar el combustible y estimular las reacciones endotérmicas de pirólisis y gasificación. Una vez la reacción endotérmica (R.2.7), llamada reacción de Boudouard y con velocidad de reacción menor a las de combustión (R. 2.3) a la misma temperatura. Las reacciones (R.2.7) y (R. 2.9) ocurren muy rápidamente a temperaturas superiores a 900 °C, y gracias a su carácter endotérmico ayudan a mantener al gas por debajo de esa temperatura[7].

Para el desarrollo de la reacción de Hidrogasificación (R. 2.8) es necesario tener sistemas acoplados a altas presiones. Caso contrario a las reacciones (R. 2.9 y R. 2.10) de reformado con vapor de agua (agua-gas) que a bajas presiones y altas temperaturas se maximizan al ser endotérmicas. Mientras que la reacción (R. 2.11) es ligeramente independiente de la temperatura.

La reacción Water-Gas Shift (R. 2.12), encargada de aumentar la producción de hidrogeno  $H_2$ , o mejorar el ratio  $H_2/CO$  del gas es independiente de la presión y se maximiza a bajas temperaturas.

Finalmente la reacción de metanación (R. 2.13) se lleva a cabo a bajas temperaturas, pero al ser exotérmica, contribuye al suministro de calor al proceso[1], por lo cual, las reacciones directas e inversas de la fase de gasificación del char tienen lugar simultáneamente a diferentes velocidades, proporciones según los reactivos disponibles a temperaturas dadas, y a su vez la composición del gas alcanza así el estado de equilibrio. La tabla 2.2 muestra las constantes de equilibrio para las reacciones de gasificación y la figura 2.3, muestra el efecto de las constantes con respecto a la temperatura de gasificación.

Tabla 2. 2 . Constantes de equilibrio de las principales reacciones de gasificación

Reacción de gasificación	Constante de equilibrio
R. 2.3 R. 2.8	$\sqrt{\log(K_p) = 9.1106 - \frac{8841.7}{T}}$ $K_p = 2.06 * 10^{-5} e^{\frac{18400}{1.8T}}$
R. 2.9	$K_p = e^{\frac{17.644 - 30260}{1.8T}}$
R. 2.10	$\log(K_p) = 2.743 - \frac{1761}{T} + \frac{1.611 * 10^6}{T^2} + \frac{2.803 * 10^8}{T^3}$
R. 2.13	$\log(K_p) = 2.93964 \ln(T_e) - \frac{10.0135}{T_e} + 12.63843 - 1.30697T_e + 0.07604T_e^2; \quad T_e = \frac{T}{1000}$

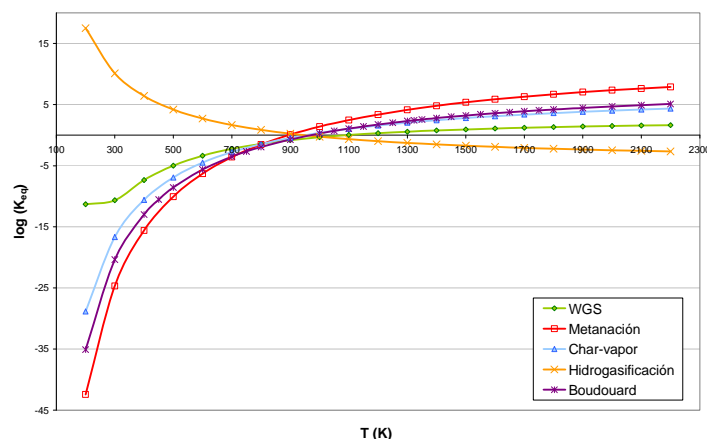


Figura 2. 3. Constantes de equilibrio de las reacciones de gasificación frente a la temperatura

## 2.3. TIPOS DE GASIFICADORES DE BIOMASA

Los gasificadores se pueden clasificar, dependiendo del agente gasificante. En tres grupos: con aire, con oxígeno y con vapor, adicionalmente se pueden subdividir a su vez en los siguientes tres tipos, dependiendo de la forma en la que

se presenta el contacto entre el combustible a gasificar y el agente gasificante (figura 2.4):

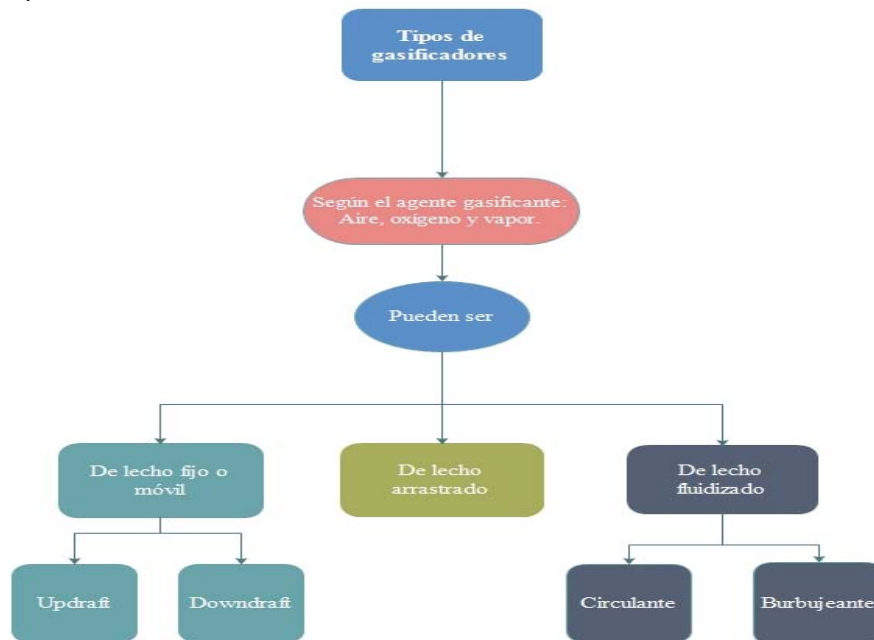


Figura 2. 4. Tipos de gasificadores

### 2.3.1. Gasificación en lecho fijo o móvil

En estos gasificadores el agente gasificante fluye de forma que entra en contacto con el material combustible a gasificar en un lecho de partículas sólidas. Dependiendo de la dirección del flujo través del lecho, estos reactores se pueden clasificar en[5].

- **Updraft**, son donde el medio gasificante fluye hacia arriba desde la parte baja y circula en contracorriente, el gas combustible es recepcionado por la parte superior a temperaturas relativamente baja, debido a que el calor sensible es utilizado para precalentar y secar el combustible, generando un alto contenido de alquitranes, por lo que en el uso de la combustión del gas producto en motores es bastante complicado (figura 2.5).

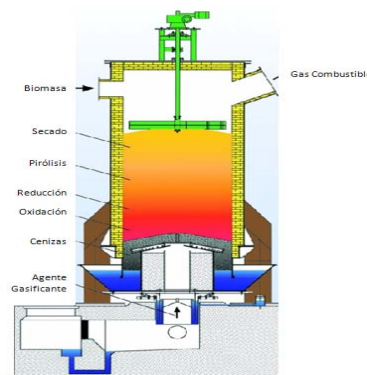


Figura 2. 5. Gasificador Updraft.

- **Downdraft**, este tipo de gasificadores reciben el agente gasificante por la parte media y el gas producido se recibe por la parte baja, ocasionando que el contenido cenizas y la humedad del gas sean el problema, por lo que generalmente se requieren tiempos prolongados de encendido, por lo que el uso de la combustión del gas en motores es más llevadera (figura 2.6).

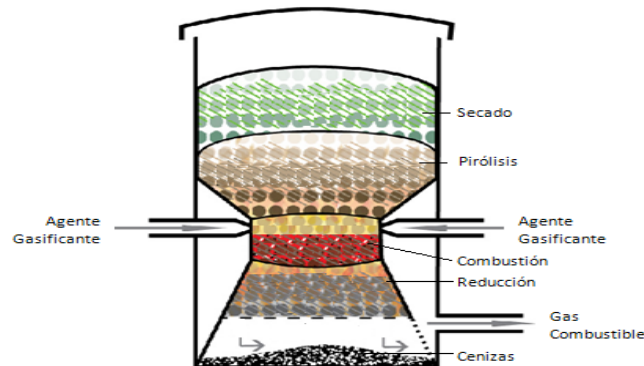


Figura 2. 6. Gasificador Downdraft

### 2.3.2. De lecho fluidizado

En este tipo de reactores el material combustible es gasificado en una cama que permite la suspensión de las partículas debido al flujo del elemento gasificante (aire, oxígeno); estos equipos se clasifican a su vez en dos tipos que comprenden lecho burbujeante o circulante. El primer reactor de lecho fluidizado fue fabricado en 1921 por el alemán Fritz Winkler y el gas producido fue empleado en motores a gas (figura 2.7).

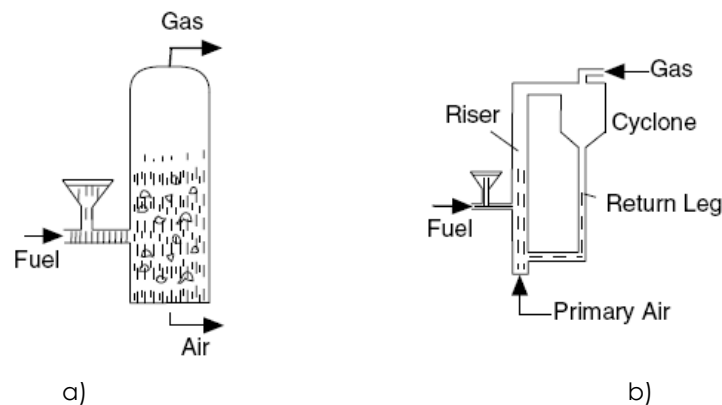


Figura 2. 7. a) Reactor de Lecho Fluidizado Burbujeante. b) Reactor de Lecho Fluidizado Circulante.  
[5]

### 2.3.3. De lecho arrastrado

En el cual las partículas del sólido combustible son suspendidas por la corriente de oxígeno o aire y vapor. En éste tipo de gasificadores la ceniza es retirada por la parte inferior del equipo en forma de escoria líquida ya que se funde debido a la alta temperatura de trabajo. Los equipos comerciales, fabricados por compañías como Texaco y Shell, generalmente trabajan con soplado de oxígeno y trabajan a presiones por encima de 3.5 MPa [5]. Los gasificadores de lecho arrastrado son

poco empleados para la gasificación de biomasa dado que requieren tamaños de partícula muy finas (80-100  $\mu\text{m}$ ), por lo cual se utilizan generalmente para la gasificación de combustibles fósiles (figura 2.8).

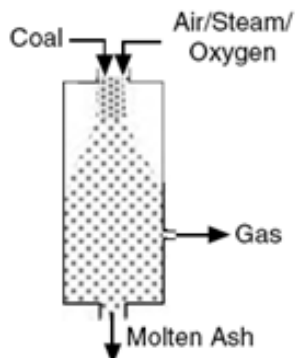


Figura 2. 8. Reactor de Lecho Arrastrado [5].

## 2.4. SUBPRODUCTOS DE LA GASIFICACIÓN

Durante el proceso de gasificación de biomasa, no todo es transformado en gas, por ende se producen subproductos tales como: residuo sólido carbonoso (Char), alquitranes (Tar) y las cenizas del combustible, siendo estos los precursores de los principales contaminantes presentes en el gas producto como partículas de polvo y hollín, alquitranes, metales alcalinos, gases alcalinos y ácidos[6]. La cantidad de estos contaminantes determina el funcionamiento del gasificador, la eficiencia del proceso de limpieza del gas y la calidad del propio gas limpio, ya que, tanto las partículas como los alquitranes causan problemas de operación en los equipos de la instalación (obstrucción de conductos, corrosión, erosión de álabes, deposición en elementos de motores, etc), por lo que el sistema de limpieza y acondicionamiento del gas es uno de los elementos primordiales en una instalación de gasificación de biomasa. Además, ya que ayuda a la reducción o conversión de char y alquitranes en gas y por ende, aumenta la eficiencia global del proceso.

### 2.4.1. Contaminantes líquidos: alquitranes

Los alquitranes presentan actualmente una de los mayores retos en la gasificación de biomasa[6][7][8]. Y es por lo cual se tiene una barrera tecnológica para la implantación comercial de procesos de generación de electricidad a partir de gasificación de biomasa es la necesidad de desarrollar tecnologías de eliminación de alquitranes. Es por ello que se está realizando un gran núcleo de investigación encaminado a su caracterización y eliminación. Los alquitranes son compuestos orgánicos de carácter aromático con elevados punto de ebullición (100-500  $^{\circ}\text{C}$ ), y se pueden desarrollar entre 50 y 100 compuestos diferentes en el proceso de gasificación[9][10], es por ello que la baja temperatura al llegar la condensación de los alquitranes es el mayor problema de las plantas de gasificación de biomasa, ya que genera problemas de taponamiento y ensuciamiento produciendo paradas indeseadas de la instalación, además de causar la desactivación de los catalizadores. Los compuestos más pesados de los alquitranes condensan en las superficies frías o forman aerosoles cuando se enfría



o se comprime el gas. Otros problemas causados por los alquitranes son los siguientes[6][11], la polimerización a elevadas temperaturas: esta genera que los alquitranes formen hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs), de mayor peso molecular, y en los casos extremos hollín, el tratamiento de vertidos: si la limpieza del gas es por vía húmeda se hace necesario gestionar la corriente de agua residual contaminada con los alquitranes (los cuales son residuos peligrosos) y la combustión de los alquitranes atomizada: genera problemas de emisiones de hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs) y formación de hollín.

Por lo cual se puede dar una clasificación de los alquitranes de generados por el proceso de gasificación a baja y alta temperatura[12]. Los de alta temperatura se forman en los procesos de gasificación de lecho *downdraft*, fluidizado o arrastrado, y contienen principalmente compuestos aromáticos apolares. Y los de baja temperatura se forman a la salida de los gasificadores *updraft*. La composición de estos alquitranes es muy compleja, además de que una gran parte de dichos compuestos son polares. La tabla 2.3 esboza la clasificación para los alquitranes de generados por el proceso de gasificación, por ende, la cantidad y composición de los alquitranes generados dependen de las características de la biomasa (tipo, humedad, tamaño de partícula, etc.), de las condiciones de operación (temperatura y presión de reacción, tiempo de residencia de las partículas y el gas, velocidad de calentamiento de la biomasa, agente gasificante y geometría del lecho, etc)[8][6]. En cuanto a la influencia del tipo de reactor, en general, la cantidad de alquitranes generados es mayor en gasificadores contracorriente, menor en lecho arrastrado y fijo equicorriente, e intermedia en gasificadores de lecho fluidizado[6]. El factor fundamental en la generación de alquitranes es la temperatura del gasificador; así, al aumentar la temperatura menor es la cantidad de alquitranes, aunque también se modifica la naturaleza de los mismos. Otro parámetro importante aunque de menor efecto es el tiempo de residencia, que al aumentar, produce una disminución en el contenido en alquitranes del gas[6].

Tabla 2. 3. Clasificación de los alquitranes[11].

Clase	Tipo de alquitrán	Compuestos presentes
1	Alquitranes indetectables por cromatografía	Fragmentos de biomasa
2	Alquitranes heterocíclicos de alta solubilidad en agua	Fenoles, cresoles, piridina, etc.
3	Alquitranes aromáticos ligeros (no intervienen en la condensación)	Benceno, tolueno, xilenos (BTX)
4	Hidrocarburos aromáticos policíclicos PAHs ligeros (2-3 anillos) (condensan a temperaturas intermedias cuando su concentración es elevada)	Naftaleno, indeno, bifenilos, antraceno
5	Hidrocarburos aromáticos policíclicos PAHs pesados (> 4 anillos) (condensan a alta temperatura y a relativa baja concentración)	Fluoranteno, pireno, criseno
6	Alquitranes detectados por cromatografía, no identificados	-



Para la medición y análisis de los alquitranes generados en el proceso de gasificación, se han desarrollado un sin número de metodologías, lo cual dificulta comparar las diferentes tecnologías de gasificación[6]. Por todo ello, en los últimos se ha dado la necesidad de desarrollar un método estandarizado de recogida, cuantificación y caracterización de alquitranes. Por lo que se desarrolló la norma CEN/TS 15439 "*Biomass gasification – tar and particles in product gases – sampling and analysis*" [13], la cual propone un sistema de muestreo cuyo esquema se presenta en la figura 2.9.

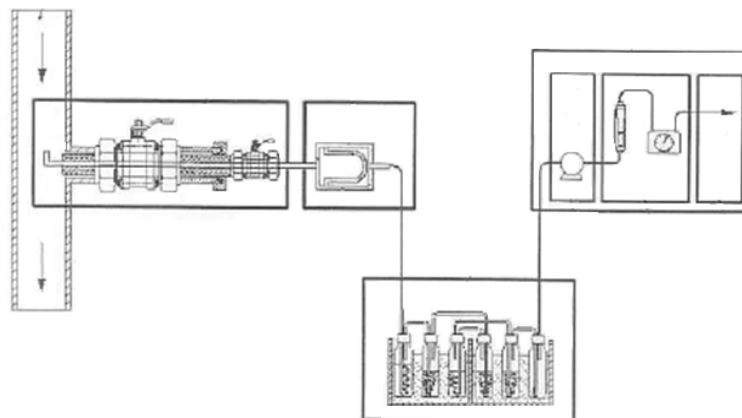


Figura 2.9. Sistema de recogida de muestreo según norma CEN/TS 15439 [13]

## 2.4.2. Contaminantes sólidos

Son los compuestos por las sustancias inorgánicas no combustibles, tales como sales minerales. Aunque es deseable que el combustible tenga una cantidad reducida de cenizas debido a los problemas de operación, tales como, sinterización, deposición, ensuciamiento de filtros, defluidización, corrosión y erosión de conductos [14], por otra parte se ha observado que ciertos elementos contenidos en las cenizas tienen efecto catalizador o inhibidor sobre ciertas reacciones[16][14][17][18][19]. Así como el  $\text{CaO}$  y el  $\text{K}_2\text{O}$  de las cenizas podrían actuar como catalizadores de la reacción WGS; otros autores han observado un aumento de la reactividad de la biomasa o del char procedente de la gasificación relacionada con el estudio de las cenizas, las cuales pueden emplearse en las siguientes aplicaciones[4], como nutriente de suelos para uso agrícola (debido al contenido en potasio, fósforo y magnesio). Sin embargo, esta aplicación contempla limitaciones en cuanto al contenido en metales pesados y el bajo contenido en ciertos nutrientes. Así mismo, se está estudiando el uso de mezclas de cenizas de biomasa y compost agrícola, como material fundente y desgrasante en empresas cerámicas (propiedad asociada al contenido en potasio), como material de construcción en (hormigón, pavimento para carreteras, etc), además de ser posible usarlas como combustible, debido a su contenido en residuo carbonoso inquemado.

El término char, hace referencia al residuo carbonoso generado durante la pirólisis del combustible. Dependiendo de las condiciones de la temperatura, velocidad de calentamiento, tiempo de residencia, el cual contiene entre el 50% y

el 80% de carbono, así como casi todo el contenido en cenizas de la biomasa original (2-10% de materia mineral), aunque el contenido en char es del 2-10% del combustible, su baja densidad hace necesario un sistema adecuado de eliminación de este material. Con frecuencia, las cenizas y el char se recogen de manera conjunta, ya que, estas se forman durante la rotura final de la estructura del char en su reacción con los gases de pirólisis. Aunque representa pérdidas de energía, también ofrece ventajas, ya que permite la recuperación de las cenizas sin necesidad de emplear filtros costosos. Y puede reutilizarse como carbón vegetal, carbón activado, acondicionador de suelos, o incluso como catalizador de reformado de alquitranes[1][20].

### 2.4.3. Limpieza del gas después del gasificador

Dentro de la eliminación de contaminantes sólidos y líquidos en el proceso de gasificación de biomasa se emplean diversos métodos, tales como, ciclones, filtros (de mangas, cerámicos), precipitadores electrostáticos y scrubbers, etc. La mayoría de los métodos físicos de limpieza sólo pueden operar a temperaturas menores de 200 °C, por ende el emplear tecnologías de limpieza en caliente como filtros cerámicos a temperaturas de 600 °C puede mejorar la eficiencia energética y los costos de operación, además de reducir el impacto ambiental y mejorar la seguridad, si bien éstos tienen pérdidas de carga elevadas. La tabla 2.4 resume los métodos físicos disponibles para la eliminación de contaminantes del gas a alta y baja temperatura.

Tabla 2. 4. Métodos de eliminación de contaminantes del gas producto.

Baja temperatura (< 200 °C)	Contaminante	Alta temperatura (> 400 °C)
Filtros, wet scrubbers, precipitadores electrostáticos (ESP)	Partículas	Ciclones, filtros granulares, filtros cerámicos, filtros metálicos
Físicos: wet scrubbers, ESP húmedos, ciclones, filtros de mangas/adsorción	Alquitranes	Térmicos/catalíticos: Reformado con vapor con catalizadores metálicos y no metálicos
Eliminación como partículas sólidas o en solución líquida	Compuestos alcalinos	Eliminación como partículas sólidas < 600 °C
Wet scrubbers	NH <sub>3</sub>	Transformación catalítica a N <sub>2</sub>
Wet scrubbers, adsorción química (ZnO)	H <sub>2</sub> S, COS, R-SH	En desarrollo
Wet scrubbers	HCl	En desarrollo

## 2.5. REFERENCIAS

- [1] Reed, T.B., Das, A. (1988). Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems. Solar Energy Research Institute. SERI/SP-271-3022. Obtenido de [http://taylor.ifas.ufl.edu/documents/Handbook\\_of\\_Biomass\\_Downdraft\\_Gasifier\\_Engine\\_Systems.pdf](http://taylor.ifas.ufl.edu/documents/Handbook_of_Biomass_Downdraft_Gasifier_Engine_Systems.pdf)
- [2] BTG Biomass Technology Group BV. (2008). BTG biomass gasification. Obtenido de [www.btgworld.com](http://www.btgworld.com)
- [3] Gasification Technologies Council. (2008). Gasification. Redefining clean energy. Obtenido de [www.gasification.org](http://www.gasification.org)
- [4] Maciejewska, A., Veringa, H., Sanders, J., Peteves, S.D. (2006). Co-firing of biomass with coal: constraints and role of biomass pre-treatment. DG JRC Institute for Energy. European Commission / ECN / Wageningen Ur. Obtenido de [www.ieabcc.nl](http://www.ieabcc.nl)
- [5] Prabir, B. (2010). Biomass gasification and pyrolysis: Practical Design and Theory. Elsevier Inc. Burlington, USA.
- [6] Gil, J. (2005). El problema de los alquitranes en la gasificación de biomasa, 88-94. Obtenido de Infopower: Actualidad y tecnología de producción y uso eficiente de la energía
- [7] Higman, C., van der Burgt, M. (2008). Gasification. GPP, Elsevier 2ª ed. ISBN 978-0-7506-8528-3.
- [8] Milne, T.A., Elam, C.C., Evans, R.J. (2002). Hydrogen from biomass. State of art and research challenges. Report IEA/H2/TR-02/001. Obtenido de [http://www.ieahia.org/pdfs/hydrogen\\_biomass.pdf](http://www.ieahia.org/pdfs/hydrogen_biomass.pdf)
- [9] Almendros, J.A. (2009). Gasificación de biomasa en lecho fluidizado. Máster de Energías Renovables y Eficiencia Energética. Universidad de Castilla-La Mancha.
- [10] Milne, T.A., Evans, R.J., Abatzoglou, N. (1998). Biomass gasifier "tars": their nature, formation, and conversion. National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-570-25357. Obtenido de <http://www.nrel.gov/docs/fy99osti/25357.pdf>
- [11] Esperanza, E. (2008) Motores de combustión interna alimentados por gas de gasificación. Ponencia del Máster en Energías Renovables y Eficiencia Energética (módulo Biomasa). Universidad de Castilla-La Mancha.
- [12] Otero, J. Curso "Tecnología de partículas en procesos industriales y su influencia medioambiental". Tema 21: Procesos de gasificación, partículas y contaminantes. CIEMAT.
- [13] CEN/TS 15439. (2006). Biomass gasification – Tar and particles in product gases – Sampling and analysis.
- [14] Wang, L., Weller, C.L., Jones, D.D., Hanna, M.A. (2008). Contemporary issues in thermal gasification of biomass and its application to electricity and fuel production. Biomass and Bioenergy 32, 573-581.
- [15] IDAE, Ministerio de Industria, Comercio y Turismo, Gobierno de España. (2007). Energía de la biomasa. Manuales de Energías Renovables. [www.idae.es](http://www.idae.es)
- [16] Lapuerta, M., Hernández, J.J., Pazo, A., López, J. (2008). Gasification and co-gasification of biomass wastes: effect of the biomass origin and the gasifier operating conditions. Fuel Processing Technology 89, 828-837.
- [17] Jenkins, B.M., Baxter, L.L., Miles, T.R., Miles Jr T.R. (1998). Combustion properties of biomass. Fuel Processing Technology 54, 17-46.
- [18] Jones, J.M., Darvell, L.I., Bridgeman, T.G., Pourkashanian, M., Williams A. (2007). An investigation of the thermal and catalytic behaviour of potassium in biomass combustion. Proceedings of the Combustion Institute 31, 1955-1963.
- [19] Gao, C., Vejahati, F., Katalambula, H., Gupta R. (2009). Co-gasification of biomass with coal and oil sand coke in a drop tube furnace. Energy and Fuels. DOI: 10.1021/ef900578t
- [20] Abu El-Rub, Z., Bramer, E.A., Brem, G. (2008). Experimental comparison of biomass chars with other catalysts for tar reduction. Fuel 87, 2243-2252.

# **CAPÍTULO III. MODELADO TERMOQUÍMICO Y EXERGÉTICO DE LA GASIFICACIÓN.**

# Índice Detallado

	Contenido	Pág.
3.1.	INTRODUCCIÓN	37
3.2.	CONSIDERACIONES	38
3.3.	EQUILIBRIO DE REACCIONES	40
3.4.	BALANCE DE ENERGÍA	41
3.5.	EFICIENCIA DEL PROCESO	41
3.6.	PROPIEDADES TERMODINÁMICAS	42
3.7.	EVALUACIÓN EXERGÉTICA	43
3.8.	REFERENCIAS	44

	Listado de tablas	Pág.
Tabla 3.1.	Entalpía de formación por componentes.	42
Tabla 3.2.	Coeficientes experimentales para calcular el calor específico de las especies involucradas	43

### 3.1 INTRODUCCIÓN

El diseño y puesta en funcionamiento de un sistema de gasificación requiere una extensa comprensión del proceso, desde la selección de la materia prima hasta la limpieza de los gases combustible. Por ello es difícil predecir la composición exacta del gas procedente de un gasificador, pero es un paso fundamental para la planificación, diseño, operación, resolución de problemas y planteamiento de mejoras [1]. En un gasificador deben coexistir dos procesos, gasificación y combustión, de forma que exista un equilibrio termoquímico donde la combustión suministra el calor necesario para sostener todas las reacciones de gasificación y se libere un gas de poder calorífico aceptable. Estos dos procesos termoquímicos están estrechamente relacionados, pero se diferencian en que la mayoría de las reacciones de gasificación son endotérmicas, permitiéndole ceder energía a los gases que libera al craquear parcialmente el combustible, mientras que la combustión rompe la mayoría de los enlaces para liberar toda la energía en la materia prima [2][3].

Numerosos investigadores han centrado sus estudios en modelos dinámicos de las reacciones presentes en el proceso, ya que los modelos cinéticos proporcionan información esencial sobre los mecanismos de cinética para describir los índices de conversión, información que es crucial en el diseño, evaluación y mejora del gasificador, mientras que los estudios en modelos de equilibrio son relativamente menos considerados, aunque proporcionan información sobre el estado estable y se utilizan para establecer parámetros óptimos de funcionamiento, balances de masa, caracterización de la biomasa y análisis comparativo de su rendimiento[4][5][6]. Por otra parte los modelos basados en los cálculos de equilibrio termodinámico no tienen en cuenta la configuración o tipo de reactor, ni la heterogeneidad en la composición, ni geometría de la biomasa [7][8][9][10][11]. No obstante los cálculos termodinámicos han sido ampliamente utilizados en la predicción de conversiones térmicas de metano, plásticos y carbón, en cuanto a biomasa, han sido utilizados para procesos de combustión, gasificación y pirólisis [12].

Un modelo convencional de equilibrio químico predice la composición del gas producto con una buena aproximación en comparación con la obtenida experimentalmente, sin embargo la precisión está limitada por la disponibilidad de datos sobre las condiciones iniciales de las reacciones [7]. Luego entonces, la selección y el desarrollo de un modelo acorde con las condiciones experimentales del proceso de gasificación, puede ser de gran ayuda en términos de entender y maniobrar ciertos parámetros que aumenten el rendimiento del proceso, porque permite jugar con variables como el poder calorífico del gas, la estabilización de las reacciones y la formación de alquitrán en función de las condiciones y parámetros de entrada, como la biomasa y el agente oxidante.

### 3.2 CONSIDERACIONES

El modelo para la gasificación de biomasa realizado en este documento está basado en el equilibrio químico de las reacciones, permite predecir la composición del gas de síntesis en función de la temperatura de gasificación y la composición elemental de la biomasa, mediante los principios de las dos primeras leyes de la termodinámica, equilibrio termodinámico y el principio de la energía libre de Gibbs. Con este se busca evaluar dos zonas de la gasificación, consideradas como las más importantes de las cuatro en las que eventualmente se supone el proceso, con el fin de facilitar el análisis acorde con el tipo de gasificador (figura 3.1). La solución del modelo se realiza en el programa Engineering Equation Solver Professional (EES), el código desarrollado a continuación se anotan los supuestos prácticos que se consideran.

La biomasa se considera como un compuesto de fórmula;  $CH_xO_yN_z$  donde se toma la composición obtenida del análisis último de la biomasa en base seca, para el cálculo de  $x, y$  y  $z$  la siguiente forma:

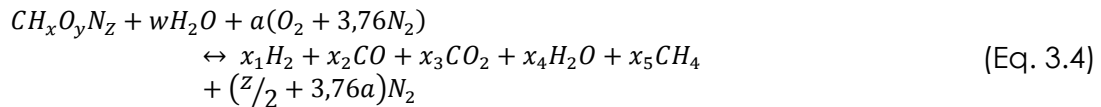
$$x = \frac{HM_C}{CM_H} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

$$y = \frac{OM_C}{CM_O} \quad (\text{Eq. 3.2})$$

$$z = \frac{NM_C}{CM_N} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

Donde  $M_i$  expresa la masa molar del C, H, O y N respectivamente según su subíndice y las designaciones representan la fracción másica en los resultados del análisis último en base seca correspondiente a cada elemento.

La reacción general de la gasificación de biomasa se desarrolla en la zona de pirólisis y oxidación, bajo un déficit de oxígeno, por tanto no se incluye en los productos:



El char se asume como un compuesto a base de carbono sin reaccionar que es consumido en su totalidad al pasar por la zona de oxidación.

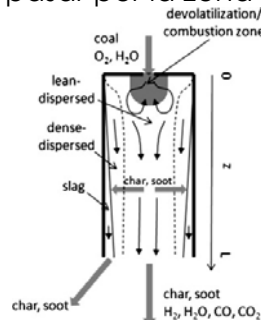


Figura 3.1. Esquema gasificador lecho arrastrado[17].

Existe equilibrio químico entre los gases producto de la reacción planteada, por lo tanto de acuerdo con el balance químico se construyen las siguientes ecuaciones:

- Balance de carbón:  
$$1 = x_2 + x_3 + x_5 \quad (\text{Eq. 3.5})$$

- Balance de hidrogeno:  
$$x + 2w = 2x_1 + 2x_4 + 4x_5 \quad (\text{Eq. 3.6})$$

- Balance de Oxigeno:  
$$y + w + 2a = x_2 + 2x_3 + x_4 \quad (\text{Eq. 3.7})$$

Dónde  $wH_2O$  es la cantidad de agua asociada a la biomasa en moles, ya separada por el proceso realizado en la zona de secado, donde  $w$  se calcula de la siguiente forma.

$$\%HR_{biomasa} = \frac{m_{H_2O}}{m_{CHxOyNz} + m_{H_2O}} = \frac{wM_{H_2O}}{M_{CHxOyNz} + wM_{H_2O}} \quad (\text{Eq. 3.8})$$

$a(O_2 + 3,76N_2)$ , Es la cantidad de aire en moles, el cual es considerado como una mezcla de  $N_2$  (79%) y  $O_2$  (21%), se supone que el argón no reacciona durante el proceso y que la cantidad de  $CO_2$  y demás gases no afecta significativamente el proceso. La relación aire combustible se define como:

$$AC_{gasificación} = \frac{aM_{aire}}{M_{CHxOyNz} + wM_{H_2O}} \quad (\text{Eq. 3.9})$$

La relación de equivalencia o Equivalente Ratio, que a su vez es el inverso del dosado relativo de gasificación y se define como:

$$ER = \frac{AC_{gasificación}}{AC_{combustión}} \quad (\text{Eq. 3.10})$$

Dónde  $AC_{gasificación}$  es la relación de aire utilizada para la gasificación de la biomasa y  $AC_{combustión}$  es la relación de aire combustible calculada para la combustión estequiométrica.

En la región más cercana a la entrada de aire, se producen reacciones de combustión exotérmicas conocida como zona de oxidación, que sustenta las reacciones endotérmicas de la pirólisis. Estos dos procesos ocurren casi simultáneamente uno bajo el otro, de tal forma que la temperatura en la zona de oxidación es suficiente para romper los productos formados por la pirólisis hasta convertirlos componentes de bajo peso molecular, en su paso por la zona de



oxidación, característica del flujo descendente, que luego sufren reformado en la zona de reducción, donde el  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  son reducidos por reacciones endotérmicas, las cuales tienen lugar en la zona de reducción. Dando paso a las siguientes reacciones:

- Reacción de Boudouard:



- Reacción Water-Gas:



- Reacción de Metano:



Donde se pueden combinar las ecuaciones 3.11



Para formar la reacción Water Gas Shift:



### 3.3 EQUILIBRIO DE REACCIONES

La composición química del gas producto a menudo no es igual a la composición de equilibrio, para calcular el grado de equilibrio entre las reacciones de reducción y producción de metano, para lo cual normalmente se utilizan datos experimentales. El equilibrio de las reacciones para el carbón se describe con las siguientes ecuaciones:

- Reacción Water-Gas Shift

$$k_1 = \exp \left[ \frac{(\bar{g}_{\text{CO}}^\circ + \bar{g}_{\text{H}_2\text{O}}^\circ - \bar{g}_{\text{CO}_2}^\circ - \bar{g}_{\text{H}_2}^\circ)}{RT} \right] = \frac{x_1 x_3}{x_2 x_4} \quad (\text{Eq. 3.15})$$

- Reacción de Metano

$$k_2 = \exp \left[ \frac{(\bar{g}_{\text{C}}^\circ + 2\bar{g}_{\text{H}_2}^\circ - \bar{g}_{\text{CH}_4}^\circ)}{RT} \right] = \frac{x_5}{x_1^2} \quad (\text{Eq. 3.16})$$

La función de Gibbs para cada componente  $i$  se determina como lo indica la ecuación:

$$\bar{g}_i^\circ = (\bar{h}_f^\circ)_i + (\bar{h}_T - \bar{h}_{T_0})_i - T(\bar{s}_T)_i \quad (17)$$

Se considera que el carbono fijo presente en el combustible tiene el mismo peso molecular que el carbono (C), por tanto para los mecanismos de reacción se utiliza como referencia el calor específico de la Antracita a  $25^\circ\text{C}$ ,  $C_p = 15,13 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K}$  [13], para los cálculos de las entalpías a temperatura de referencia y proceso.

### 3.4 BALANCE DE ENERGÍA

El balance de energía con primera ley para la gasificación de biomasa se detalla en la siguiente ecuación 3.18, y asume uno de los supuestos más importantes, al abordar la gasificación como un proceso adiabático.

$$\bar{h}_{f_{CHxOyNz}}^{\circ} + wH_{H_2O-l}^{\circ} + a(H_{O_2}^{\circ} + 3,76H_{N_2}^{\circ}) = x_1H_{H_2}^{\circ} + x_2H_{CO}^{\circ} + x_3H_{CO_2}^{\circ} + x_4H_{H_2O-g}^{\circ} + x_5H_{CH_4}^{\circ} + (z/2 + 3,76m)H_{N_2}^{\circ} \quad (\text{Eq. 3.18})$$

Donde,  $H_i^{\circ} = \bar{h}_{f_i}^{\circ} + (\bar{h}_T - \bar{h}_{T_0})_i$  representa las diferencias de entalpía a las condiciones alcanzadas por cada componente.

La entalpía de formación para la biomasa se obtiene resolviendo la siguiente reacción con las entalpías de formación de cada componente conocido:



Despejando  $x$  por balance de oxígeno en la ecuación queda igual a  $2(y - 2)$ , donde  $y$  son las moles de oxígeno presentes en la biomasa. Por lo tanto el balance de energía se expresa de la siguiente forma:

$$\bar{h}_{f_{CHxOyNz}}^{\circ} = -HHV_{biomasa} + \bar{h}_{f_{CO_2}}^{\circ} + (y - 2)\bar{h}_{f_{H_2O-l}}^{\circ} \quad (\text{Eq. 3.20})$$

Donde  $HHV_{biomasa}$  es el poder calorífico superior de la biomasa en kJ/kmol determinado por la ecuación 3.21 desarrollada por [14].

$$HHV_{biomasa} = (349,1C + 1.178,3H + 100,5S - 103,4O - 15,1N - 21,1Ash)M_{CHxOyNz} \quad (\text{Eq. 3.21})$$

Donde  $C, H, S, O, N$  y  $Ash$  expresan la fracción másica correspondiente a cada elemento bajo los resultados del análisis último de la biomasa en base seca. El poder calorífico inferior de la biomasa es designado como  $LHV_{biomasa}$  en kJ/kmol, se determina con la ecuación:

$$LHV_{biomasa} = HHV_{biomasa} - \frac{w}{M_{CHxOyNz}} \bar{h}_{v_{H_2O}}^{\circ} \quad (\text{Eq. 3.22})$$

La entalpía de vaporización de agua se calcula con la forma:

$$\bar{h}_{v_{H_2O}}^{\circ} = \bar{h}_{f_{H_2O-l}}^{\circ} - \bar{h}_{f_{H_2O-g}}^{\circ} \quad (\text{Eq. 3.23})$$

### 3.5 EFICIENCIA DEL PROCESO

La eficiencia energética del proceso de gasificación se determina con base en los poderes caloríficos del gas producto y de la biomasa mediante la ecuación a temperaturas de referencia, porque se considera que la biomasa entra al

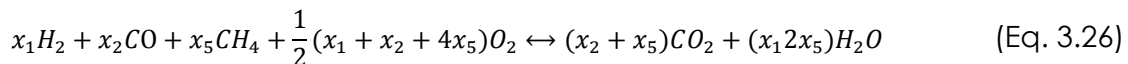
gasificador a temperatura ambiente 25°C al igual que el gas combustible. Con base en esto se define la eficiencia como:

$$\eta_l = \frac{N_{gas} LHV_{gas}}{HHV_{biomasa}} \quad (\text{Eq. 3.24})$$

Donde  $LHV_{gas}$  es el poder calorífico inferior del gas producto en kJ/kmol y se determina mediante la diferencia entre el poder calorífico superior del gas ( $HHV_{gas}$ ) y la entalpía de vaporización de agua contenida en este:

$$LHV_{gas} = HHV_{gas} - \frac{x_4}{M_{gas}} \bar{h}_{vH_2O}^\circ \quad (\text{Eq. 3.25})$$

El  $HHV_{gas}$  es determinado asumiendo una combustión completa del gas combustible con aire, donde se libera toda su energía, considerando la siguiente reacción:



La entalpía de formación el gas se obtiene con las entalpías de formación de cada componente y las moles presentes:

$$\bar{h}_{f_{gas}}^\circ = x_2 \bar{h}_{f_{CO}}^\circ + x_5 \bar{h}_{f_{CH_4}}^\circ \quad (\text{Eq. 3.27})$$

Realizando el balance de energía para la reacción nos queda:

$$HHV_{gas} = -\bar{h}_{f_{gas}}^\circ + (x_2 + x_5) \bar{h}_{f_{CO_2}}^\circ + (x_1 + 2x_5) \bar{h}_{f_{H_2O-l}}^\circ \quad (\text{Eq. 3.28})$$

El poder calorífico del gas combustible está expresado en kJ/kmol.

### 3.6 PROPIEDADES TERMODINÁMICAS

La entalpía de formación descrita en la tabla 3.1 se considera a condiciones estándar para cada componente, 25°C y 101,325kPa.

Tabla 3. 1. Entalpía de formación por componentes.

Componente	$\bar{h}_f^\circ$ (kJ/kmol)	M [Kg/Kmol]
Dióxido de carbono	-393.520	44,0095
Agua líquida	-285.830	18,0153
Vapor de agua	-241.820	18,0153
Monóxido de Carbono	-110.530	28,0101
Metano	-74.850	16,0424
Carbón	0	12,0107
Hidrogeno	0	2,01588
Nitrógeno	0	28,0134
Oxígeno	0	31,9988

El calor específico se calcula bajo una correlación empírica con los coeficientes expuestos en la tabla 3.2.

Tabla 3. 2. Coeficientes experimentales para calcular el calor específico de las especies involucradas.

Especies de gases	<i>a</i>	<i>B</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	Temperatura (K)
Hidrogeno	29,11	$-0,1916 \times 10^{-2}$	$0,4003 \times 10^{-5}$	$-0,8704 \times 10^{-9}$	273–1.800
Monóxido de Carbono	28,16	$0,1675 \times 10^{-2}$	$0,5372 \times 10^{-5}$	$-2,222 \times 10^{-9}$	273–1.800
Dióxido de carbono	22,26	$5,981 \times 10^{-2}$	$-3,501 \times 10^{-5}$	$-7,469 \times 10^{-9}$	273–1.800
Vapor de agua	32,24	$0,1923 \times 10^{-2}$	$1,055 \times 10^{-5}$	$-3,595 \times 10^{-9}$	273–1.800
Metano	19,89	$5,204 \times 10^{-2}$	$1,269 \times 10^{-5}$	$-11,01 \times 10^{-9}$	273–1.500
Nitrógeno	28,90	$-0,1571 \times 10^{-2}$	$0,8081 \times 10^{-5}$	$-2,873 \times 10^{-9}$	273–1.800
Correlación utilizada					
$\Delta \bar{h}_T = \int_{T_0}^T \bar{C}_p dT \quad \rightarrow \quad \bar{C}_p = a + bT + cT^2 + dT^3$					

El modelo se plantea bajo los conceptos propuestos por Z.A. Zainal en su artículo "*Prediction of performance of a downdraft gasifier using equilibrium modeling for different biomass materials*" [9], teniendo en cuenta algunas modificaciones realizadas por Jayah, Melgar, Jarungthammachote y Sekhar [8] [10][11][15]. Los datos y correlaciones referenciadas para el cálculo del calor específico son las sugeridas por Jarungthammachote y Sekhar [10][11], no obstante se verifica concordancia tanto en valores de las constantes como en los procedimientos de cálculo con los propuestos por los libros de Winterbone y Moran [13][16].

### 3.7 EVALUACIÓN EXERGÉTICA

La eficiencia exergética, representa la relación entre los flujos de exergía de entrada y de salida del proceso de gasificación en este caso. Las eficiencias pueden ser cuantificadas a partir de solo su potencial químico o cuantificando la exergía física[16]. Las ecuaciones 3.29 y 3.30 indican la evaluación de estas eficiencias química y total de flujo, la exergía de la biomasa en la ecuación 3.31 y  $\beta$  de la ecuación 3.32 y 3.33.

$$\Psi_{CH} = \frac{n_{gas} e_{ch,gas}}{e_{ch,biomasa}} \quad (\text{Eq. 3.29})$$

$$\Psi = \frac{n_{gas}(e_{ch,gas} + e_{ph,gas})}{e_{ch,biomasa} + n_{aire} e_{aire}} \quad (\text{Eq. 3.30})$$

$$e_{ch,biomasa} = \beta(LHV_{Biomasa}) \quad (\text{Eq. 3.31})$$

$$\beta = \frac{[1.0414 + 0.177 \left(\frac{C}{H}\right) - 0.3328 \left(\frac{O}{C}\right) (1 + 0.3377(H))]}{1 - 0.4021 \left(\frac{O}{C}\right)} \quad (\text{Eq. 3.32})$$

La ecuación 3.33 determina la exergía física de flujo para gases. Esta relación es usada para determinar la exergía del aire empleado como agente oxidante.

$$e_{ph} = (h - h_o) - T_o(s - s_o) \quad (\text{Eq. 3.33})$$

### 3.8 REFERENCIAS

- [1] Puig-Arnavat, M., Carles Bruno, J., Coronas, A. (2010). Review and analysis of biomass gasification models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), pp. 2841–2851.
- [2] Basu, P. (2010). *Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory*. Burlington, USA: Elsevier.
- [3] Bridgwater, A., & Grassi, G. (1991). *Biomass Pyrolysis Liquids Upgrading And Utilisation*. London and New York: Elsevier Applied Science.
- [4] Ho Lee, D., Yang, H., Yan, R., & Tee Liang, D. (2007). Prediction of gaseous products from biomass pyrolysis through combined kinetic and thermodynamic simulations. *Fuel*, 86(3), pp. 410–417.
- [5] Gao, N., & Li, A. (2008). Modeling and simulation of combined pyrolysis and reduction zone for a downdraft biomass gasifier. *Energy Conversion and Management*, 49(12), pp. 3483–3490.
- [6] Olgun, H., Ozdogan, S., & Yinesor, G. (2011). Results with a bench scale downdraft biomass gasifier for agricultural and forestry residues. *Biomass and Bioenergy*, 35(1), pp. 572–580.
- [7] Giltrap, D., McKibbin, R., & Barnes, G. (2003). A steady state model of gas-char reactions in a downdraft biomass gasifier. *Solar Energy*, 74(1), pp. 85–91.
- [8] Melgar, A., Pérez, J., Laget, H., & Horillo, A. (2007). Thermochemical equilibrium modelling of a gasifying process. *Energy Conversion and Management*, 48(1), pp. 59–67.
- [9] Zainal, Z., Ali, R., Lean, C., & Seetharamu, K. (2001). Prediction of performance of a downdraft gasifier using equilibrium modeling for different biomass materials. *Energy Conversion and Management*, 42(12), pp. 1499–1515.
- [10] Jarunghammachote, S., & Dutta, A. (2007). Thermodynamic equilibrium model and second law analysis of a downdraft waste gasifier. *Energy*, 32(9), pp. 1660–1669.
- [11] Sekhar Barman, N., Ghosh, S., & De, S. (2012). Gasification of biomass in a fixed bed downdraft gasifier – A realistic model including tar. *Bioresource Technology*, 107, pp. 505–511.
- [12] Babu, B., & Chaurasia, A. (2004). Pyrolysis of biomass: improved models for simultaneous kinetics and transport of heat, mass and momentum. *Energy Conversion and Management*, 45(9–10), pp. 1297–1327.
- [13] Moran, M., & Shapiro, H. (2006). *Fundamentals of Engineering Thermodynamics* 5th Ed. West Sussex - England: Wiley.
- [14] Channiwala, S., & Parikh, P. (2002). A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels. *Fuel*, Vol 81(8), pp. 1051–1063.
- [15] Jayah, T., Aye, L., Fuller, R., & D.F., S. (2003). Computer simulation of a downdraft wood gasifier for tea drying. *Biomass and Bioenergy*, Vol 25(4), pp. 459–469.
- [16] Winterbone, D. (1996). *Advanced Thermodynamics for Engineers*. Manchester, UK: Butterworth Heinemann.
- [17] Szargut J. and Steward, F. (1988). *Exergy analysis of thermal, chemical metallurgical processes*.
- [18] Fabio Montagnaro, Piero Salatino, Analysis of char-slag interaction and near-wall particle segregation in entrained-flow gasification of coal, *Combustion and Flame*, Volume 157, Issue 5, May 2010, Pages 874-883, ISSN 0010-2180,.

# **CAPÍTULO IV INSTALACIÓN EXPERIMENTAL Y METODOLOGÍA.**

# Índice Detallado

	Contenido	Pág.
4.1.	INSTALACIÓN EXPERIMENTAL	48
4.1.1.	Pre-tratamiento de combustible	49
4.1.2.	Sistemas complementarios de la planta piloto de gasificación en lecho arrastrado	50
4.1.2.1.	Sistema para alimentación de combustible	50
4.1.2.2.	Sistema para alimentación de aire	51
4.1.2.3.	Sistema para alimentación de vapor	52
4.1.2.4.	Sistema para la mezcla de reactivos	52
4.1.2.5.	Sistemas de seguridad durante la operación de la planta de gasificación de biomasa en lecho arrastrado	53
4.1.3.	Gasificador de Lecho Arrastrado	54
4.1.4.	Línea de salida del gas producto	55
4.1.5.	Micro-Cromatógrafo de gases	56
4.1.6.	<i>Línea de recogida de alquitranes</i>	57
4.1.7.	Quemador atmosférico	58
4.1.8.	Sistema Water-Gas Shift	59
4.1.9.	REFERENCIAS	60
4.2.	METODOLOGÍA	61
4.2.1.	Parámetros empleados y variables de estudio	61
4.2.2.	Parámetros de caracterización del proceso	62
4.3.	PLAN DE ENSAYOS	64
4.3.1.	Estudio del efecto de la adición de vapor	66
4.3.2.	Estudio del efecto de la temperatura	67
4.3.3.	Estudio del efecto del tiempo de residencia	67
4.3.4.	Estudio del efecto del dosado relativo de gasificación	67
4.3.5.	Estudio del efecto del ratio S/B	68
4.3.6.	REFERENCIAS	69
	<b>Listado de figuras</b>	<b>Pág.</b>
Figura 4.1.	Esquema de la instalación experimental.	48
Figura 4.2.	Vista de la planta piloto de gasificación	48
Figura 4.3.	Trituradora de biomasa Modelo EGH 2440	49
Figura 4.4.	Balanza de humedad A&D	49
Figura 4.5.	Molinos y tamizadora para pretratamiento de combustible	50
Figura 4.6.	Báscula SARTORIUS Signum 1	50
Figura 4.7.	Sistema de alimentación y dosificación de combustible.	51
Figura 4.8.	Caudalímetro de aire TECFLUID SC-15	51
Figura 4.9.	Generador de vapor PID Eng&Tech	52
Figura 4.10.	Sistema de quemador para la mezcla de reactivos.	52
Figura 4.11.	Detector de monóxido de carbono MONOXER	53
Figura 4.12.	Sistema de respiración autónomo SPERIAN	53
Figura 4.13.	Disposición de las zonas de calentamiento del horno eléctrico ENERGON H-1143, vista del gasificador y detalle de las resistencias	54

	<b>Listado de figuras</b>	<b>Pág.</b>
<b>Figura 4.14.</b>	Línea de salida del gas producto y el cenicero.	55
<b>Figura 4.15.</b>	Micro-cromatógrafo de gases AGILENT 3000	56
<b>Figura 4.16.</b>	Visualización de datos obtenidos mediante SOPRANE.	57
<b>Figura 4.17.</b>	Módulos TES	57
<b>Figura 4.18.</b>	Quemador atmosférico PA Hilton C551	58
<b>Figura 4.19.</b>	Reactor Water-gas shift	59
<b>Figura 4.20.</b>	Curvas termogravimétricas de las biomásas empleadas en atmósfera oxidante (izquierda) e inerte (derecha)	66

	<b>Listado de tablas</b>	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 4.1.</b>	Características de las columnas del micro-cromatógrafo de gases AGILENT 3000.	56
<b>Tabla 4.2.</b>	Requerimientos del gas síntesis para diferentes aplicaciones finales [10]	63
<b>Tabla 4.3.</b>	Poder calorífico superior e inferior del orujo lavado de uva en base húmeda, seca y seca y libre de cenizas	65
<b>Tabla 4.4.</b>	Análisis elemental del orujo lavado de uva en base húmeda y seca.	65
<b>Tabla 4.5.</b>	Análisis inmediato del orujo lavado de uva (en base húmeda).	65
<b>Tabla 4.6.</b>	Fórmula empírica y dosado estequiométrico del orujo lavado de uva (en base seca).	65
<b>Tabla 4.7.</b>	Plan de estudio para el efecto de la adición de vapor	66
<b>Tabla 4.8.</b>	Plan de ensayos para el estudio de la temperatura de reacción	67
<b>Tabla 4.9.</b>	Plan de ensayos para el estudio del efecto del tiempo de residencia.	67
<b>Tabla 4.10.</b>	Plan de ensayos para el estudio del dosado relativo de gasificación	68
<b>Tabla 4.11.</b>	Plan de ensayos para el estudio del efecto del ratio S/B	68



## 4.1 INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

Dentro del desarrollo de los experimentos realizados en el presente trabajo de investigación, se utilizó la planta piloto de gasificación en lecho arrastrado del Grupo de Combustibles y Motores de la Universidad de Castilla-La Mancha en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Ciudad Real (Ver figura 4.1 y 4.2).

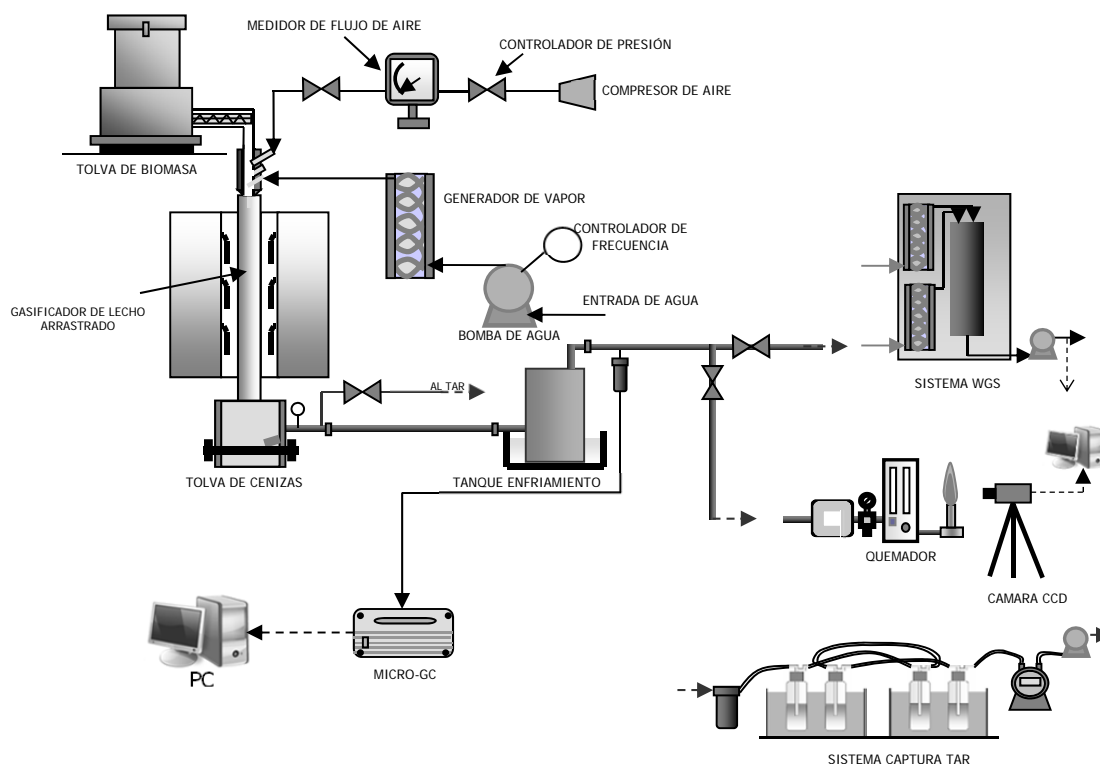


Figura 4. 1. Esquema de la instalación experimental.



Figura 4. 2. Vista de la planta piloto de gasificación.

### 4.1.1 Pre-tratamiento de combustible

Para la gasificación de biomasa en lecho arrastrado se debe asegurar en la experimentación un primer triturado en caso de recibir biomasa leñosa en forma de ramas de gran tamaño. Con el objeto de reducir el tamaño de las muestras de biomasa hasta un valor adecuado para su tratamiento en el molino, se ha empleado una trituradora marca Royal Einhell, modelo EGH 2440 [3], capaz de procesar en continuo muestras con un diámetro máximo de 40 mm, valor a partir del cual el troceado debe hacerse manualmente. En la Figura 4. 3 se muestra una fotografía de este equipo, y posteriormente el combustible es completamente pulverizado, con miras a aumentar la conversión.



Figura 4. 3. Trituradora de biomasa Modelo EGH 2440

Además, se tiene una balanza de humedad A&D [2]. Permite determinar el contenido en humedad de las muestras de biomasa (Ver figura 4.4).

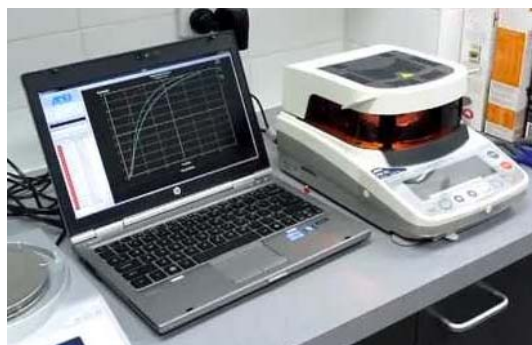


Figura 4. 4. Balanza de humedad A&D

Para la reducción de tamaño se usa un molino de cuchillas RETSCH SM100 Comfort [3], este realiza un triturado primario de la biomasa. Consta de una cámara de triturado en el interior de la cual se disponen tres cuchillas. Un motor eléctrico (1500 W) se encarga del giro de las cuchillas (1430 rpm), reduciendo el tamaño de partícula. Una serie de tamices intercambiables de Conidur permite conseguir distintos tamaños finales de partícula. El equipo también dispone de un sistema de alimentación de muestra, así como de un recipiente de recogida de material

procesado, que luego es pasado por un molino ultracentrífugo RETSCH ZM200 [4]. Con una potencia de 750 W, dispone de un rotor de doce dientes que gira a una velocidad regulable de hasta 18000 rpm. Adicionalmente un conjunto de tamices anulares permite seleccionar el tamaño de partícula de la biomasa en una tamizadora electromagnética CISA RP08 [5] posibilita el movimiento tridimensional (combinación de movimiento vertical de amplitud regulable y de movimiento rotacional). Permite el uso de hasta 8 tamices de 50 mm, y dispone de sistemas de regulación de amplitud (potencia) y de temporizador (ver figura 4.5).

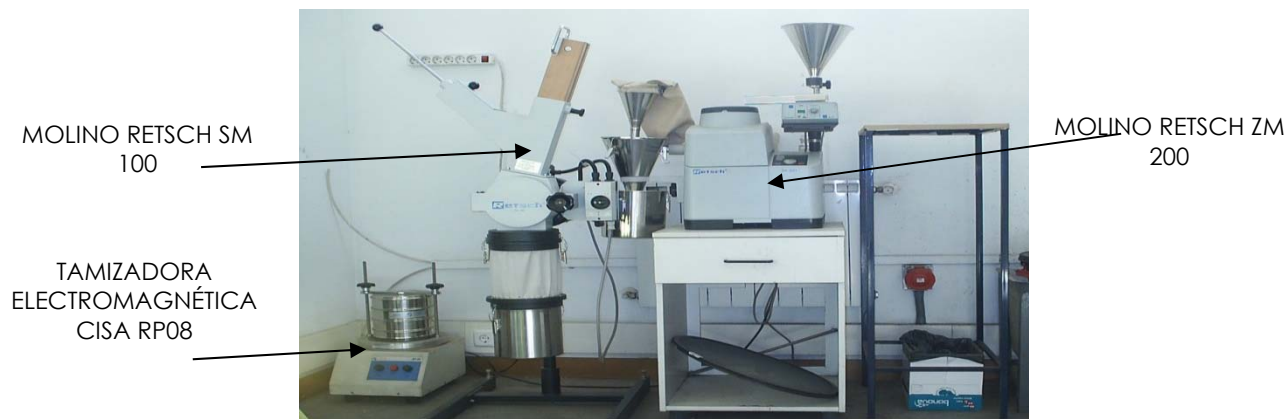


Figura 4. 5. Molinos y tamizadora para pretratamiento de combustible

Por último, para el pesado de la biomasa adecuada en los sistemas mencionados anteriormente se hace en una balanza SARTORIUS Signum 1 (ver figura 4.6). Que permite el pesado de la biomasa antes y después de cada ensayo de gasificación, con una precisión de  $\pm 1$  g y hasta un máximo de 65 kg, con el fin de obtener el caudal másico de combustible.



Figura 4. 6. Báscula SARTORIUS Signum 1.

#### 4.1.2 Sistemas complementarios de la planta piloto de gasificación en lecho arrastrado

##### 4.1.2.1. Sistema para alimentación de combustible

Una vez es acondicionado en tamaño y humedad el combustible, es llevado a la tolva de alimentación SCHENCK AccuRate [6], con una capacidad de 30 Litros, la cual, es agitada por paletas accionadas por un motor eléctrico que mueven las paredes de teflón de la tolva, impidiendo la formación de canales y bóvedas.

Un tornillo sin fin, dosifica volumétricamente y de transporta la biomasa desde el interior al exterior de la tolva. La biomasa baja por gravedad al tubo de alimentación, y luego es arrastrada por el agente gasificante (aire o vapor) al entrar en contacto en el quemador (ver figura 4.7).

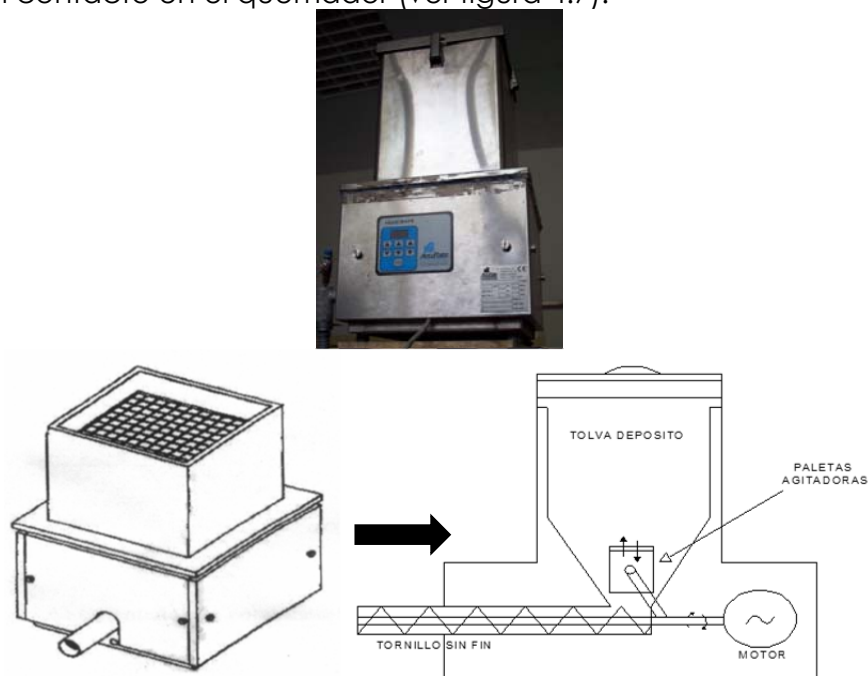


Figura 4. 7. Sistema de alimentación y dosificación de combustible.

#### 4.1.2.2. Sistema para alimentación de aire

El agente gasificante inicial en el proceso de gasificación para los ensayos procede de una línea de aire comprimido, el cual es ajustado según el plan de ensayos con cualquier otro agente gasificante, por ende, se usa un regulador que permite seleccionar la presión de entrada del aire al sistema. El caudal volumétrico puede medirse mediante un caudalímetro TECFLUID SC-15 [7] (figura 4.8), cuyo funcionamiento se basa en el desplazamiento de una boya en el interior de un orificio calibrado, y su rango de medida se encuentra entre 1.5 y 15 Nm<sup>3</sup>/h. Un tornillo regulador situado antes de la entrada al quemador permite regular de forma precisa el caudal de aire.



Figura 4. 8. Caudalímetro de aire TECFLUID SC-15

#### 4.1.2.3. Sistema para alimentación de vapor

Para la adición de vapor a la planta de gasificación de biomasa en lecho arrastrado como agente gasificante se emplea un generador de vapor suministrado por PID Eng&Tech, mostrado en la figura 4.9. El agua para la producción de vapor es regulado mediante un variador de frecuencia incorporado en una bomba Damova DR-13X11/1B, cuyo caudal máximo es de 6.7 L/h, y pasa a un serpentín de  $\frac{1}{4}$ " de diámetro exterior rodeado por un horno de 3000 W de potencia. La temperatura máxima de trabajo es de 500 °C. El vapor sobrecalentado producido se introduce al gasificador por una de las entradas del quemador, donde se mezcla con el resto de reactivos (aire y biomasa).

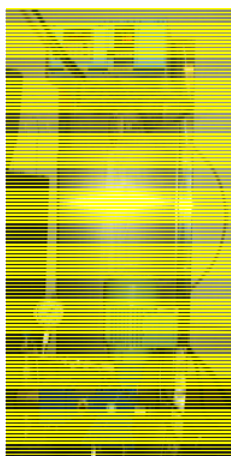


Figura 4. 9. Generador de vapor PID Eng&Tech

#### 4.1.2.4. Sistema para la mezcla de reactivos

Una vez inicia la operación de la planta de gasificación en lecho arrastrado se usa para la introducción y mezcla de los distintos reactivos (combustible y agentes gasificantes, un quemador de acero inoxidable con cuatro entradas: una axial, de 1" para el combustible pulverizado, y tres entradas tangenciales de  $\frac{3}{8}$ " (para aire, vapor, y otro agente gasificante que pueda llegar a emplearse, como nitrógeno, u oxígeno) que permiten una mezcla efectiva y un buen arrastre del combustible. El quemador se encuentra situado en el extremo superior del tubo de alúmina (ver figura 4.10).

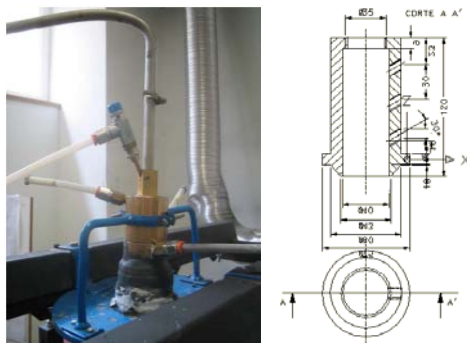


Figura 4. 10. Sistema de quemador para la mezcla de reactivos.

#### 4.1.2.5. Sistemas de seguridad durante la operación de la planta de gasificación de biomasa en lecho arrastrado

Para una operación segura de la planta, debido a las extremas condiciones de trabajo en el laboratorio (atmósfera combustible y con alta concentración de material particulado, alta temperatura de trabajo, presencia de compuestos tóxicos y explosivos) se hace necesario el uso de equipos y sistemas que permitan una operación segura de la planta piloto. Dichos sistemas son los siguientes:

- Campana extractora de gases combustibles.
- Sistema de renovación de aire (con una capacidad de 5 renovaciones/hora).
- Detector de CO MONOXER [8] (ver figura 4.11). Proporciona señal visual y acústica cuando el nivel de CO en el recinto supera las 150 ppm.



Figura 4. 11. Detector de monóxido de carbono MONOXER

- Dos sistemas de respiración independiente SPERIAN [8], los cuales se conectan a la línea de aire comprimido del laboratorio, proporcionando un caudal de aire respirable para aquellas ocasiones en las que las condiciones del aire, no admitan una operación segura (en particular, cuando los niveles de CO puedan afectar la salud humana). Están compuestos por sendas máscaras protectoras, líneas de aire conectadas mediante racores de conexión rápida, y un sistema de filtración de aire comprimido (ver figura 4.12).



Figura 4. 12. Sistema de respiración autónomo SPERIAN



### 4.1.3 Gasificador de Lecho Arrastrado

El sistema de gasificación de lecho arrastrado empleado para la realización de los ensayos, opera a una presión levemente por encima a la atmosférica, y consiste en un tubo cerámico de alúmina (material elegido por su resistencia a elevadas temperaturas y a la corrosión química, si bien mecánicamente frágil), de 1.2 m de longitud, 60 mm de diámetro interior y 7.5 mm de espesor, rodeado por un horno eléctrico ENERGON H-1143 [10] el cual posee tres zonas independientes de control de temperatura (Superior, Central e Inferior) de 7 kW cada una, para lograr mantener la temperatura de reacción como una variable independiente en todos los ensayos (figura 4.13), adicionalmente unas resistencias en forma de U fabricadas con  $\text{MoSi}_2$  tipo MD-33 3/6 permiten alcanzar temperaturas de hasta 1600 °C en el exterior del reactor. Y tres termopares tipo R miden la temperatura de cada una de las zonas del tubo cerámico, mientras que el control de temperatura y la velocidad de calentamiento se efectúa mediante tres controladores EURO THERM 208e. Por su parte, existen tres termopares tipo B y controladores de seguridad EURO THERM 2132. El aislamiento que recubre interiormente al horno está compuesto por fibras cerámicas de diferentes tipos, la más externa de las cuales es fibra moldeada al vacío KVS 174/400, cuya máxima temperatura de trabajo son 1700 °C.

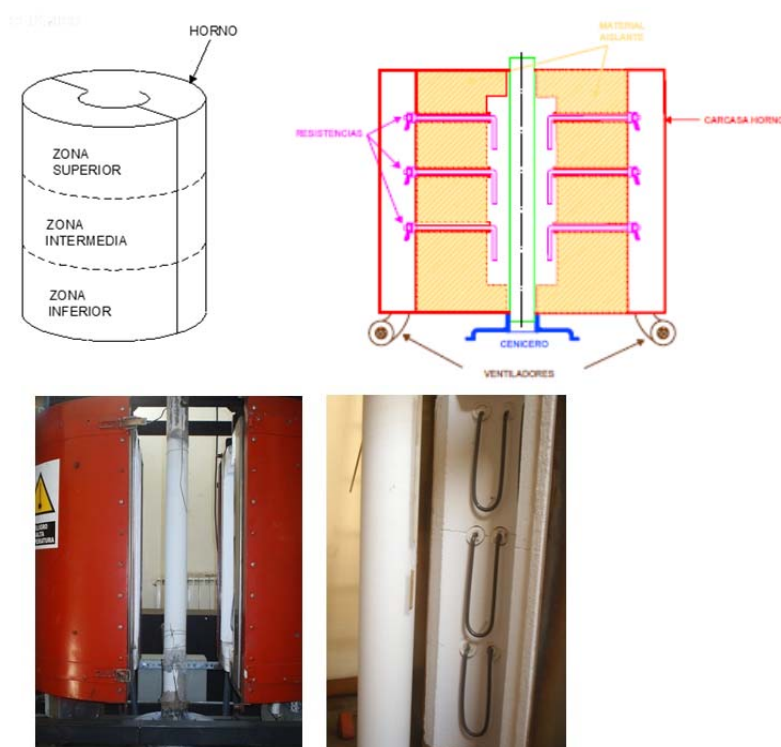


Figura 4. 13. Disposición de las zonas de calentamiento del horno eléctrico ENERGON H-1143, vista del gasificador y detalle de las resistencias

#### 4.1.4 Línea de salida del gas producto

Una vez, se tiene el proceso generando en la planta de gasificación de lecho arrastrado, atraviesa en primer lugar el recipiente situado en la parte inferior del gasificador, encargado de efectuar una primera recogida de las cenizas y del residuo carbonoso generado como subproductos en el proceso (Figura 4.14), este recipiente, fue suministrado por MECAFA, S.A, está fabricado en acero inoxidable, y se encuentra recubierto interiormente de material refractario. Una aleta deflectora actúa como remanso, facilitando la deposición del material sólido. Un conjunto de uniones roscadas, así como las ruedas existentes en la parte inferior, permiten una extracción sencilla del contenido del recipiente después de cada experimentación.

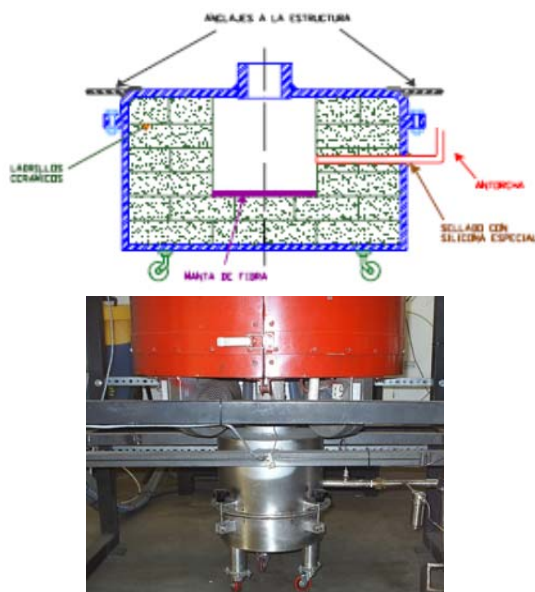


Figura 4. 14. Línea de salida del gas producto y el cenicero.

A la salida del cenicero un termopar tipo B se encarga de medir la temperatura de salida del gas. Ésta indica como se está llevando a cabo el proceso de gasificación, a la vez que permite detectar si la temperatura es excesiva para el paso por el filtro de mangas, y con el fin de reducir la temperatura de salida del gas hasta niveles que no supongan un daño sobre el tejido de la manga filtrante (modelo FILMAN) fabricado por MECAFA, S.A. [11] en el cual las partículas presentes en el gas quedan retenidas al atravesar éste el tejido de la manga filtrante (construida con fibra de vidrio, material más resistente a la temperatura). Un sistema electro neumático de aire comprimido ACMA ACTM-04/10 (compuesto por un calderín de aire, una válvula de 2 vías y un programador electrónico analógico), permite la limpieza del filtro mediante la aplicación de pulsos de aire [12]. Un sistema de uniones roscadas en la parte inferior permite la recogida de las partículas retenidas por el filtro. Un conjunto de válvulas permite derivar el gas hacia la salida (extractor de gases) o bien hacia una línea que puede conectarse bien a un quemador atmosférico de gas (empleado para el estudio de las propiedades termoquímicas de combustión del gas producto), a una línea de muestreo y recogida de alquitranes o a un reactor



catalítico empleado para el estudio de la reacción Water-Gas Shift, adicionalmente se extrae por una línea de muestreo de acero inoxidable de 1/8", provista de un filtro de partículas HEADLINE SS 120-100H y de una bomba KNF N86 AT.16 [13] para vencer las pérdidas de carga, conduce las muestras de gas hacia el cromatógrafo de gases.

#### 4.1.5 Micro-Cromatógrafo de gases

Para conocer el comportamiento de la gasificación en la planta de lecho arrastrado se mide la composición del gas producto. Por ello, el cromatógrafo de gases es uno de los elementos principales de la instalación, este análisis de los gases se realiza con el microcromatógrafo de gases (Micro GC) portátil Agilent 3000 (ver figura 4.15) [14]. El cual es capaz de trabajar de forma totalmente independiente en línea para realizar análisis rápidos y precisos. Consta de dos módulos, cada uno de los cuales incluye un inyector calefactado, una columna de muestra, una columna de referencia, un detector de conductividad térmica (TCD), un equipo de control electrónico de presión, solenoides de flujo de gas y una tarjeta de control. Las características de las columnas se recogen en la Tabla 4.1, En el primer módulo, se detectan CO, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>; en el segundo se detectan CO<sub>2</sub> y C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>. Los términos de detección de este equipo son de 10 ppm para gases permanentes y de 1 ppm para hidrocarburos.

Tabla 4. 1. Características de las columnas del micro-cromatógrafo de gases AGILENT 3000.

Canal	A	B
<i>Tipo inyector</i>	Backflush	Backflush
<i>Detector</i>	TCD	TCD
<i>Tipo columna</i>	Tamiz molecular 5 A	Plot U
<i>Longitud</i>	10 m	8 m
<i>Gas portador</i>	Argón	Helio
<i>Especies detectadas</i>	CO, H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
<i>Temperatura máxima</i>	180 °C	160 °C
<i>Precolumna</i>	Plot U	Plot Q



Figura 4. 15. Micro-cromatógrafo de gases AGILENT 3000

Para establecer los valores de la caracterización del gas en su composición el Micro GC, emplea el software SOPRANE (ver figura 4.16), incluido con el

cromatógrafo permite la adquisición, visualización, comparación y tratamiento de los datos obtenidos en los ensayos de gasificación [15]. Asimismo, permite visualizar las señales de los instrumentos que se llevan a las tarjetas de adquisición de datos (módulos TES, ver figura 4.17) [16].

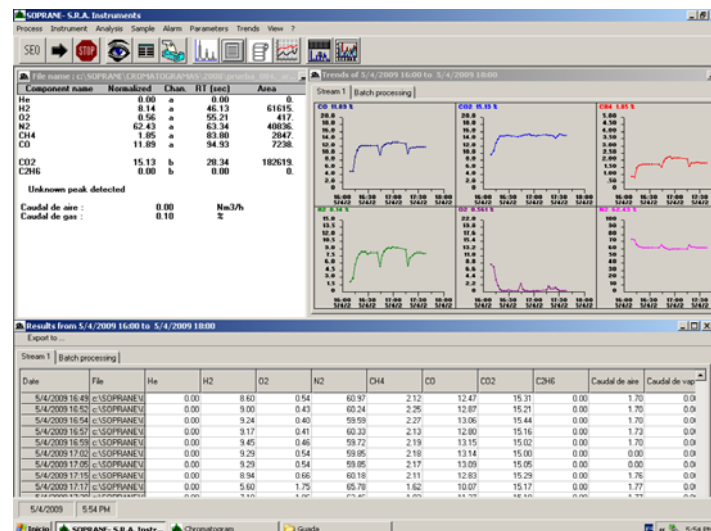


Figura 4. 16. Visualización de datos obtenidos mediante SOPRANE.



Figura 4. 17. Módulos TES

#### 4.1.6 Línea de recogida de alquitranes

Para la medición y análisis de los alquitranes generados en el proceso de gasificación, se han desarrollado un sin número de metodologías, lo cual dificulta comparar las diferentes tecnologías de gasificación. Por todo ello, en los últimos se ha dado la necesidad de desarrollar un método estandarizado de recogida, cuantificación y caracterización de alquitranes generados en el proceso de gasificación. Con este fin, se ha diseñado una línea de recogida y muestreo de alquitranes, siguiendo las recomendaciones de la norma CEN-TS 15439 "*Biomass gasification – Sampling and Analysis -Tar and particles in product gases*" [17], aunque con algunas modificaciones con el fin de adaptarla a las condiciones del laboratorio, por lo cual para la planta de gasificación se tiene una línea acoplada sobre una estructura dotada de ruedas para permitir el transporte del sistema:

- Dos borboteadores HEADLINE 132BB [18], de acero inoxidable, inmersos en sendos baños, uno caliente (Memmert serie BASIC WNB14, con regulación de temperatura de 20 °C – 95 °C, con capacidad de 14 L, que se mantiene durante la recogida a 40 °C [19]), y otro frío (PolyScience 9506, con regulación de temperatura de -30°C/150 °C, con capacidad de 13 L, que se mantiene a una temperatura de -20 °C [20]). El objetivo de este gradiente de temperaturas es lograr una recogida más eficiente de los alquitranes que se encuentran en el gas en forma de aerosoles [21]. Los borboteadores se rellenan con isopropanol, en el cual se disuelven los alquitranes presentes en el gas.
- Un borboteador HEADLINE 755PC-BB, fabricado en policarbonato, relleno de fibra de vidrio, cuya misión es retener los posibles aerosoles que pudiesen quedar en el gas antes de entrar en el caudalímetro.
- Un caudalímetro másico BRONKHORST High-Tech IN-FLOW [22], que permite medir el caudal másico de gas que circula por la línea. La medida se visualiza en una pantalla por medio de una unidad electrónica BRONKHORST HI-TEC E-7500-10-GDD, permitiendo una lectura directa o porcentual [23].
- Una bomba de vacío de diafragma KNF N 0150 AN.12 E [24], encargada de vencer las numerosas pérdidas de carga introducidas por los anteriores elementos [24].
- Un manómetro WIKA 732.14 mide el salto de presión logrado por la bomba [25].

#### 4.1.7 Quemador atmosférico

Para conocer las condiciones del gas producido en la planta piloto se cuenta con un quemador atmosférico tipo Bunsen P.A. Hilton Ltd. C551 (ver figura 4.18), con sus rotámetros y válvulas que permiten regular los caudales de gas y aire con el fin de controlar el dosado relativo de combustión del gas pobre. Este quemador se emplea para evaluar llamas tanto difusivas como premezcladas. Una serie de boquillas de diferentes diámetros admite estudiar la estabilidad de llamas en un amplio rango de velocidades de salida y configuraciones del quemador. Una descripción detallada del equipo y los resultados obtenidos con el mismo se puede encontrar en las referencias [26][27].



Figura 4. 18. Quemador atmosférico PA Hilton C551

#### 4.1.8 Sistema Water-Gas Shift

Para evaluar las características del gas pobre se tiene un sistema suministrado por PID Eng&Tech, el cual, tiene como objetivo llevar a cabo la reacción Water-Gas Shift (ver figura 4.19), con el fin de incrementar el contenido en hidrógeno del gas producto [28]. El equipo tiene los siguientes elementos:

- Sistema de alimentación de gases.
- Horno precalentador de gases de 3000 W, empleado para elevar la temperatura del gas hasta 400 °C.
- Sistema de alimentación de N<sub>2</sub> y H<sub>2</sub> para inertización y activación del catalizador del reactor.
- Mezclador de gases.
- Bomba HPLC para la dosificación de agua.
- Horno evaporador de agua de 3000 W para la producción de vapor de hasta 400 °C.
- Reactor catalítico de lecho fijo. Realizado en acero inoxidable 316 de 1 ½" de espesor, con un volumen de 1.5 L, longitud de 1.2 m y diámetro interior de 35.5 mm. La presión máxima del reactor es de 2 bar. La temperatura máxima del reactor es de 900 °C, lograda mediante un horno de 3000 W que rodea el reactor.
- Serpentín de refrigeración y depósito de condensación.



Figura 4. 19. Reactor Water-gas shift

#### 4.1.9 REFERENCIAS

- [1] EINHELL refuse shredder. *Operating instructions*. Tomado de [http://www.einhell-uk.co.uk/downloads/BG-KS\\_2040.pdf](http://www.einhell-uk.co.uk/downloads/BG-KS_2040.pdf)
- [2] A&D Moisture analyser. (2004). *Instruction manual*. Tomado de <http://www.aandd.jp/products/software/winctmois.html>
- [3] RETSCH. (1999). *Instrucciones de uso del molino de cuchillas tipo SM 100*. Tomado de [www.retsch.com](http://www.retsch.com)
- [4] RETSCH. (2005). *Instrucciones del molino ultracentrifugo tipo ZM 200*.
- [5] CISA. (2003). *Tamizadora electromagnética RP 08 D200-D203. Manual de instalación y funcionamiento*. Tomado de [www.cisa.net](http://www.cisa.net)
- [6] SCHENK. (1995). *300 Feeder Instruction manual*. Tomado de <http://www.accuratefeeders.com/volumetricfeeders.html>
- [7] TECFLUID. *Medidor de caudal metálico, por flotador. Series SC-250/SM-250*. Tomado de [www.tecfluid.com](http://www.tecfluid.com)
- [8] DURÁN Electrónica. *Monoxer*. Tomado de [www.duranelectronica.com](http://www.duranelectronica.com)
- [9] SPERIAN Clearflow2. *Instrucciones de uso*. Tomado de [www.sperianprotection.com](http://www.sperianprotection.com)
- [10] ENERGÓN. *Horno split vertical modelo H-1143*.
- [11] MECAFA, S.A. *Instrucciones de servicio para los filtros de limpieza por inyección*.
- [12] ACMA, S.L. *Manual de instrucciones timer: ACTM-04/10*.
- [13] KNF Neuberger GmbH. *Hints on function, installation and service*. Tomado de [www.knf.de](http://www.knf.de)
- [14] Agilent Technologies. (2002). *Microcromatógrafo de gases AGILENT 3000. Información del usuario*. Tomado de [www.agilent.com](http://www.agilent.com)
- [15] SRA Instruments. *Soprane*. Tomado de [www.sra-instruments.com](http://www.sra-instruments.com)
- [16] LEROY Automation. *Remote input output interface TES. User's manual*. P DOC TES 001 E V. 3.0. Tomado de [www.leroy-automation.com](http://www.leroy-automation.com)
- [17] CEN/TS 15439. (2006). *Biomass gasification – Tar and particles in product gases – Sampling and analysis*.
- [18] HEADLINE FILTERS. *Product information. Filters for instrumentation & gas analysis*. Tomado de [www.headlinefilters.com](http://www.headlinefilters.com)
- [19] MEMMERT WNB 7-45. (2008). *Instrucciones de manejo*. Tomado de [www.memmert.com](http://www.memmert.com)
- [20] POLYSCIENCE. (2008). *Operator's manual. Standard controller models*.
- [21] Neeft, J.P.A. (2005). *Rationale for setup of impinger train as used in the Technical Specification of sampling and analysis of tar and particles in the product gases of biomass gasification. Technical background document*. CEN BT/TF 143.
- [22] BRONKHORST HIGH-TECH. (2008). *General instructions digital mass flow/pressure instruments laboratory style / IN-FLOW. Instruction manual*.
- [23] BRONKHORST HIGH-TECH. (2007). *Digital readout and control system E-7000 for analog and digital instruments. Instruction manual*.
- [24] KNF Neuberger GmbH. *Diaphragm vacuum pumps and compressors. Operating instructions*. Tomado de [www.knf.de](http://www.knf.de)
- [25] WIKA Alexander Wiegand GmbH & Co. KG. *Instrucciones de servicio*. Tomado de [www.wika.de](http://www.wika.de)
- [26] Ruiz, L.M. (2008). *Estudio teórico-experimental de las propiedades de combustión del gas de gasificación de biomasa*. Trabajo de Investigación. Universidad de Castilla-La Mancha y Universidad Rey Juan Carlos.
- [27] Hernández, J.J., Serrano, C., Ruiz, L., Aranda, G. (2008). *Effect of the biomass origin and the gasifier operating conditions on the combustion interchangeability of the producer gas*. Proceedings of the 16<sup>th</sup> European Biomass Conference & Exhibition. Valencia, España.
- [28] PID Eng&Tech. (2009). *Planta piloto para sistema de muestreo de tars y generador de vapor. Manual de usuario*. Referencia interna PP0826TARPCYT.

## 4.2 METODOLOGÍA

### 4.2.1. Parámetros empleados y variables de estudio

Las condiciones de operación cuyo efecto se ha estudiado en el presente trabajo se cuantifican mediante las variables que se presentan a continuación:

- Tiempo de residencia ( $t_r$ ): Expresado en segundos, se define como el intervalo temporal que permanece el agente gasificante (aire en este caso) en el interior del reactor. La expresión que permite obtener esta variable es como sigue:

$$t_r = \frac{V_r [m^3]}{\dot{V}_a \left[ \frac{m^3}{s} \right]} \quad \text{Eq. (4.1)}$$

Donde  $V_r$  representa el volumen del reactor (cuyas dimensiones son conocidas), y  $\dot{V}_a$  es el caudal volumétrico de aire en las condiciones de reacción. Dicho caudal se obtiene de la siguiente manera:

$$\dot{V}_a \left[ \frac{m^3}{s} \right] = \frac{\dot{m}_a \left[ \frac{kg}{s} \right]}{\rho_a \left[ \frac{kg}{m^3} \right]} \quad \text{Eq. (4.2)}$$

$\dot{m}_a$  Es el caudal másico de aire (variable conocida en los ensayos, ya que se obtiene multiplicando la densidad del aire a temperatura ambiente,  $1.2 \text{ kg/m}^3$  por el caudal volumétrico de aire, medido con el caudalímetro). Por su parte,  $\rho_a$ , la densidad del aire en el interior del reactor ( $1050 \text{ }^\circ\text{C}$ ), se obtiene asumiendo que el aire se comporta como gas ideal:

$$\rho_a \left[ \frac{kg}{m^3} \right] = \frac{p [Pa]}{R_a \left[ \frac{J}{kg \cdot K} \right] * T [K]} \quad \text{Eq. (4.3)}$$

El tiempo de residencia en los ensayos se modificó mediante la variación de la presión de entrada del aire al reactor (y por tanto, la velocidad superficial del mismo). Así, el caudal de aire de referencia se estableció en  $2 \text{ Nm}^3/\text{h}$  a 3 bares (presión de calibración del caudalímetro); a partir de esta referencia, se aplicó el siguiente factor de corrección por presión a la lectura del caudalímetro:

$$\dot{V}_a [p' \neq p_{cal}] = F * \dot{V}_a * (p_{cal}) = \sqrt{\frac{1.013 + p'}{1.013 + p_{cal}}} \dot{V}_a (p_{cal}) \quad \text{Eq. (4.4)}$$

Para mantener el dosado relativo constante, se optó por variar la velocidad del tornillo de alimentación de combustible (por tanto, el caudal másico del mismo).

- Dosado relativo de gasificación ( $F_{rg}$ ): Representa el déficit de oxígeno del combustible en el proceso de gasificación, a través de la relación



combustible/agente gasificante puede determinarse su valor con la proporción entre la relación utilizada y la requerida en una reacción estequiométrica.

$$\bullet F_{rg} = \frac{F}{F_{est}} = \frac{m_{comb}/m_{ag}}{F_{est}} \quad \text{Eq. (4.5)}$$

- Porcentaje de vapor añadido: Es la proporción entre la cantidad de vapor empleada (S) y el total de agente gasificante empleado, el cual es la suma de las partes de vapor (S) y aire (A).

$$\% \text{ vapor} = \frac{S}{n_{ag}} = \frac{S}{A + S} * 100\% \quad \text{Eq. (4.6)}$$

- Temperatura de reacción (T): Medida en grados centígrados, se mantuvo constante en todos los ensayos a 1050 °C (temperatura exterior del tubo). El horno eléctrico que rodea al reactor permite que la temperatura se mantenga como variable de operación independiente.

#### 4.2.2. Parámetros de caracterización del proceso

- Composición del gas producto: obtenida mediante los resultados de los análisis cromatográficos realizados en cada ensayo. A dicha composición se le aplica una corrección para eliminar el contenido en oxígeno presente en la composición debido a entradas del exterior.
- Poder calorífico inferior del gas producto ( $PCI_{gp}$ ): Esta propiedad del gas, medida en MJ/kg o MJ/Nm<sup>3</sup>, define la aplicación final del gas. Así, un gas con un poder calorífico bajo (~ 5-10 MJ/kg) puede emplearse en motores de gas o turbinas de gas; por el contrario, para la síntesis de combustibles, se requiere un gas con un elevado poder calorífico (~20 MJ/kg).

$$PCI_{gp} \left[ \frac{MJ}{Nm^3} \right] = \sum_i X_i * PCI_i \quad \text{Eq. (4.7)}$$

$$PCI_{gp} \left[ \frac{MJ}{kg} \right] = \frac{PCI_{gp} \left[ \frac{MJ}{Nm^3} \right]}{\rho_{gp} \left[ \frac{kg}{Nm^3} \right]} \quad \text{Eq. (4.8)}$$

- Producción de gas (GY): También conocido como *gas yield*, representa la cantidad de gas producida por cada unidad másica de combustible introducida en el gasificador. Se mide en Nm<sup>3</sup>/kg (daf) o en kg / kg (daf), y se calcula como sigue:

$$GY \left[ \frac{kg}{kg} \right] = \frac{\dot{m}_{gp}}{\dot{m}_{f.d.a.f}} * 100 \quad \text{Eq. (4.9)}$$

$$GY \left[ \frac{Nm^3}{kg} \right] = \frac{\dot{V}_{gp}}{\dot{m}_{f.d.a.f}} * 100 \quad \text{Eq. (4.10)}$$

- Rendimiento de gasificación ( $n_g$ ): Este parámetro, usualmente llamado *cold gas efficiency* en bibliografía, se define como la fracción de energía procedente del combustible presente en el gas de gasificación producido como energía química, y se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$n_g[\%] = \frac{\dot{m}_{gp} * PCI_{gp}}{\dot{m}_{f.d.a.f} * PCI_f} * 100 = GY * \frac{PCI_{gp}}{PCI_f} * 100 \quad \text{Eq. (4.11)}$$

- Conversión de carbón y de hidrógeno (CC, HC): Expresa la fracción de carbono y de hidrógeno presente en el combustible que pasa a estar presente en el gas producto, respectivamente. Las expresiones correspondientes se indican a continuación:

$$CC[\%] = \frac{\frac{12}{28}\dot{m}_{CO} + \frac{12}{16}\dot{m}_{CH_4} + \frac{24}{30}\dot{m}_{C_2H_6} + \frac{12}{28}\dot{m}_{CO_2}}{\dot{m}_f C_f} * 100 \quad \text{Eq. (4.12)}$$

$$HC[\%] = \frac{\dot{m}_{H_2} + \frac{4}{16}\dot{m}_{CH_4} + \frac{6}{30}\dot{m}_{C_2H_6}}{\dot{m}_f H_f} * 100 \quad \text{Eq. (4.13)}$$

- Ratio  $H_2/CO$ : la proporción molar entre el hidrógeno y el monóxido de carbono contenidos en el gas producto proporciona una indicación sobre la posible aplicación del gas producto (ver tabla 4.2), al tiempo que permite averiguar si en el proceso se está favoreciendo algún tipo de reacción de gasificación.

Tabla 4. 2. Requerimientos del gas síntesis para diferentes aplicaciones finales [10].

Compuesto / propiedad	Combustibles sintéticos (F-T)	Meta-nol	$H_2$	Gas combustible					
				Caldera	Turbina	Pila de combustible			
						PAFC	MCFC	SOFC	PEFC
$H_2/CO$	0.6-2	~2	Alto	No importante	No importante	$H_2$ es combustible, pero CO es veneno > 0.5 %	Tanto $H_2$ como CO son combustibles, preferentemente $H_2$	Tanto $H_2$ como CO son combustibles	$H_2$ es combustible pero CO > 10 ppm es veneno

$$\frac{H_2}{CO} = \frac{X_{H_2}}{X_{CO}} \quad \text{Eq. (4.14)}$$

- Ratio  $CO/CO_2$ : la proporción molar entre monóxido y el dióxido de carbono es un indicador del grado de extensión de las reacciones de gasificación frente a las de combustión. En concreto, está relacionado con el grado de extensión de la reacción de Boudouard (R. 2.7).

$$\frac{CO}{CO_2} = \frac{X_{CO}}{X_{CO_2}} \quad \text{Eq. (4.15)}$$



- Ratio  $\text{CH}_4/\text{H}_2$ : esta proporción indica en qué grado se está produciendo la reacción de Hidrogasificación (R. 2.8).

$$\frac{\text{CH}_4}{\text{H}_2} = \frac{X_{\text{CH}_4}}{X_{\text{H}_2}} \quad \text{Eq. (4.16)}$$

- Ratio  $\text{H}_2/\text{CO}_2$ : expresa en qué grado se desarrolla la reacción de reformado con vapor (R. 2.9) frente a la water-gas shift (R. 2.12).

$$\frac{\text{H}_2}{\text{CO}_2} = \frac{X_{\text{H}_2}}{X_{\text{CO}_2}} \quad \text{Eq. (4.17)}$$

- Conversión del combustible: este parámetro se ha empleado para la determinación experimental del grado de transformación del combustible en gas a medida que varía el tamaño de partícula, empleando para ello la medida de la masa de residuo recogida tras cada ensayo, según la siguiente expresión:

$$FC[\%] = \left(1 - \frac{m_{\text{residuo}}}{m_f}\right) * 100 \quad \text{Eq. (4.18)}$$

### 4.3. PLAN DE ENSAYOS

En el siguiente numeral se presenta la planificación sistemática de las pruebas que se han llevado a cabo con el fin de obtener los datos experimentales. En el caso del presente trabajo de investigación, se han diseñado y ejecutado dos tipos de ensayos: por una parte, los ensayos realizados en la planta piloto de gasificación, encaminados a estudiar el efecto de la adición de vapor en peso, del tiempo de residencia y la temperatura de reacción, y del dosado relativo de gasificación; y por otra parte, los ensayos de biomasa realizados para la determinación de la influencia de las condiciones de operación (contenido de biomasa en el combustible, dosado relativo de gasificación y temperatura de reacción). Adicionalmente se puede establecer mediante el estudio del Char, que este porcentaje de mezcla aire – vapor disminuye la capacidad energética, por ende mejora el poder calorífico del gas pobre.

Un aspecto que influye considerablemente en los parámetros de operación estudiados son las propiedades termoquímicas de la biomasa ensayada, en este caso, el orujo lavado de uva. Por otra parte, para la obtención de los distintos parámetros de este trabajo (dosado estequiométrico, rendimiento de gasificación, conversión) es necesario contar con datos obtenidos directa o indirectamente de los resultados mediante un análisis termoquímico.

Por estas razones resulta indispensable realizar una caracterización previa completa del combustible empleado posteriormente en los ensayos de gasificación. Los ensayos realizados a la biomasa utilizada han sido los siguientes:

- El análisis inmediato fue obtenido por medio de análisis termogravimétrico (TGA), empleando un analizador TA Instruments Q500. El procedimiento experimental

empleado para realizar el análisis inmediato puede consultarse en las referencias [1][2][3].

- El análisis elemental se obtuvo mediante un analizador LECO CHNS-932, de acuerdo con las normas CEN/TS-15104 y CEN-TS-15289 [4][5].
- El poder calorífico superior (PCS) se obtuvo mediante una bomba calorimétrica PARR, siguiendo el procedimiento descrito en la norma UNE-164001-EX [6]. El poder calorífico inferior (PCI) se obtuvo a partir del PCS y del contenido en hidrógeno (obtenido en el análisis elemental), según el procedimiento recogido en [7].

De manera simultánea se determinó la humedad de la muestra mediante una balanza de humedad A&D MX-50 con el fin de transformar todas las propiedades a base seca. Las tablas 4.3-6 recogen los resultados correspondientes a la caracterización termoquímica de las biomásas empleadas:

Tabla 4. 3. Poder calorífico superior e inferior del orujo lavado de uva en base húmeda, seca y seca y libre de cenizas.

Combustible	Humedad (%)	Cenizas (%)	PCS <sub>bh</sub> (MJ/kg)	PCS <sub>bs</sub> (MJ/kg)	PCI <sub>bs</sub> (MJ/kg)	PCI <sub>bh</sub> (MJ/kg)	PCI (dal) (MJ/kg)
Orujo lavado de uva	7.79	6.46	18.57	20.29	18.93	17.45	20.23

Tabla 4. 4. Análisis elemental del orujo lavado de uva en base húmeda y seca.

Combustible	BASE HÚMEDA (% masa)				BASE SECA (% masa)		
	humedad	volátiles	carbono fijo	Cenizas	volátiles	carbono fijo	cenizas
Orujo lavado de uva	7.79	60.51	25.12	6.46	65.70	27.28	7

Tabla 4. 5. Análisis inmediato del orujo lavado de uva (en base húmeda).

Combustible	C (%)	H (%)	N (%)	S (%)	O <sup>1</sup> (%)
Orujo lavado de uva	47.21	5.97	2.29	0.15	37.92

Tabla 4. 6. Fórmula empírica y dosado estequiométrico del orujo lavado de uva (en base seca).

Combustible	Fórmula empírica	F <sub>est</sub>
Orujo lavado de uva	C H 1.29 O 0.49 N 0.041 S 0.0012	0.16

En comparación a otras especies biomásicas, el orujo lavado de uva presenta unas propiedades similares. Se caracterizan por un elevado contenido en volátiles (entre un 66% y un 85% en base seca), un bajo contenido en cenizas (entre 0.4 y 6.3% en base seca) y un poder calorífico moderado en torno a 17-19 MJ/kg en base seca. Por otra parte, es destacable el bajo contenido en nitrógeno y azufre. El orujo lavado de uva se caracteriza por una cantidad apreciablemente mayor de cenizas y un menor contenido en volátiles. Adicionalmente, su poder calorífico es alto una vez descontadas la humedad y cenizas y presenta una cantidad de nitrógeno mayor que otros tipos de biomasa.

La figura 4.20. Representa las curvas termogravimétricas obtenidas para el orujo lavado de uva y otras biomásas. En el caso de atmósfera oxidante, se observan dos picos diferenciados de pérdida de materia, uno correspondiente a la hemicelulosa y

otro, menor, correspondiente a la lignina de la biomasa. Por su parte, en el caso de atmósfera inerte, se detecta un único pico de pérdida de materia, correspondiente a la materia volátil de los combustibles (descomposición de celulosa y hemicelulosa) [8]. La altura de dicho pico, así como la temperatura a la que se produce, se encuentra asociada a la reactividad del combustible. Así, cuanto mayor sea el pico de desvolatilización en la curva DTG, y cuanto menor sea la temperatura a la que se produce dicho máximo, más reactivo se considera el combustible [9]. De acuerdo con esto, se puede observar que la desvolatilización se lleva a cabo en un rango de temperaturas muy estrecho, entre 300-400 °C. Sin embargo, se comprueba cómo el serrín de pino y la madera de pino silvestre son los combustibles con un mayor contenido en volátiles, mientras que el orujo lavado de uva tiene un contenido en volátiles notablemente inferior.

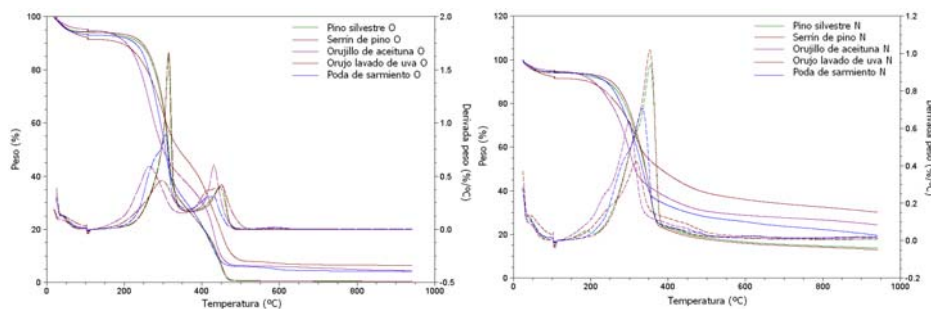


Figura 4. 20. Curvas termogravimétricas de las biomosas empleadas en atmósfera oxidante (izquierda) e inerte (derecha).

#### 4.3.1. Estudio del efecto de la adición de vapor

Para estudiar el efecto de la adición de vapor, se tomaron como constantes el tiempo de residencia y la temperatura de reacción. Se aumenta gradualmente la cantidad de vapor a medida que se disminuye la cantidad de aire hasta llegar a un 100% de vapor en el agente gasificante. La tabla 4.7 recoge el plan de ensayos diseñado:

Tabla 4. 7. Plan de estudio para el efecto de la adición de vapor

T (°C)	m <sub>r</sub> (kg/h)	m <sub>a</sub> (kg/h)	m <sub>ag</sub> (kg/h)	tr (s)	% vapor	F <sub>rg</sub>
1050	1.01	3.00	3.00	1.07	0.00	2.09
	1.19	2.04	2.68	1.06	23.88	3.92
	1.65	1.96	2.63	1.07	25.48	5.58
	1.63	1.98	2.98	0.91	33.61	5.50
	1.17	1.80	2.82	0.95	36.17	4.36
	1.11	1.51	2.51	1.05	39.84	4.92
	1.00	1.33	2.38	1.09	44.08	4.06
	0.71	1.03	2.03	1.25	49.26	4.63
	0.88	1.01	2.31	1.06	56.34	5.95
	0.93	0.82	2.22	1.08	63.13	7.74
	0.82	0.00	2.00	1.04	100.00	Infinito

#### 4.3.2. Estudio del efecto de la temperatura

En este apartado, se consideraron el tiempo de residencia, el porcentaje de vapor y el total de agente gasificante. La tabla 4.8 muestra el plan de ensayos propuesto:

Tabla 4.8. Plan de ensayos para el estudio de la temperatura de reacción

T (°C)	m <sub>r</sub> (kg/h)	m <sub>a</sub> (kg/h)	m <sub>ag</sub> (kg/h)	tr (s)	% vapor	Frg
750	0,93	1,20	2,25	1,14	46,63	5,23
750	0,91	1,30	2,35	1,10	44,76	4,74
850	0,84	1,20	2,25	1,14	46,63	4,73
850	0,99	1,30	2,35	1,10	44,72	5,16
950	0,92	1,30	2,35	1,10	44,76	4,77
1050	1,00	1,33	2,38	1,09	44,08	5,04
1050	0,91	1,20	2,25	1,14	46,67	5,09
1150	1,09	1,31	2,36	1,10	44,49	5,59

#### 4.3.3. Estudio del efecto del tiempo de residencia

La tabla 4.9 presenta el plan de ensayos diseñado con el fin de estudiar el efecto del tiempo de residencia sobre el proceso de gasificación en lecho arrastrado. En este conjunto de ensayos se mantienen constantes la temperatura de reacción.

Tabla 4. 9. Plan de ensayos para el estudio del efecto del tiempo de residencia.

T (°C)	m <sub>r</sub> (kg/h)	m <sub>a</sub> (kg/h)	m <sub>ag</sub> (kg/h)	tr (s)	% vapor	Frg
1050	1,63	1,98	2,98	0,91	33,61	5,50
	1,17	1,80	2,82	0,95	36,17	4,36
	0,82	0,00	2,00	1,04	100,00	Infinito
	1,11	1,51	2,51	1,05	39,84	4,92
	1,19	2,04	2,68	1,06	23,88	3,92
	0,88	1,01	2,31	1,06	56,34	5,95
	1,01	3,00	3,00	1,07	0,00	2,09
	1,65	1,96	2,63	1,07	25,48	5,58
	0,93	0,82	2,22	1,08	63,13	7,74
	1,00	1,33	2,38	1,09	44,08	4,06
	0,71	1,03	2,03	1,25	49,26	4,63

#### 4.3.4. Estudio del efecto del dosado relativo de gasificación

Como primera anotación, se considera el dosado relativo de gasificación una variable independiente del tiempo de residencia, se mantiene constante tanto el flujo total de agente gasificante al igual que la temperatura. Se varía la cantidad de biomasa gasificada para variar el dosado relativo de gasificación. La tabla 4.10 recoge el plan de ensayos diseñado con este fin.

Tabla 4. 10. Plan de ensayos para el estudio del dosado relativo de gasificación.

T (°C)	m <sub>r</sub> (kg/h)	m <sub>a</sub> (kg/h)	m <sub>ag</sub> (kg/h)	tr (s)	% vapor	Frg
1050	1.01	3.00	3.00	1.07	0.00	2.09
	1.19	2.04	2.68	1.06	23.88	3.92
	1.00	1.33	2.38	1.09	44.08	4.06
	1.17	1.80	2.82	0.95	36.17	4.36
	0.71	1.03	2.03	1.25	49.26	4.63
	1.11	1.51	2.51	1.05	39.84	4.92
	1.63	1.98	2.98	0.91	33.61	5.50
	1.65	1.96	2.63	1.07	25.48	5.58
	0.88	1.01	2.31	1.06	56.34	5.95
	0.93	0.82	2.22	1.08	63.13	7.74
	0.82	0.00	2.00	1.04	100.00	Infinito

#### 4.3.5. Estudio del efecto del ratio S/B

Se mantuvieron constantes el tiempo de residencia y temperatura de operación. Se variaron la cantidad de combustible y agente gasificante, además del contenido de vapor. La tabla 4.11 muestra las condiciones ensayadas.

Tabla 4. 7. Plan de ensayos para el estudio del efecto del ratio S/B

T (°C)	m <sub>r</sub> (kg/h)	m <sub>a</sub> (kg/h)	m <sub>ag</sub> (kg/h)	tr (s)	% vapor	S/B	Frg
1050	1.01	3.00	3.00	1.07	0,00	0,00	2,09
	1,65	1,96	2,63	1,07	25,48	0,43	5,58
	1,19	2,04	2,68	1,06	23,88	0,54	3,92
	1,63	1,98	2,98	0,91	33,61	0,62	5,50
	1,17	1,80	2,82	0,95	36,17	0,92	4,36
	1,11	1,51	2,51	1,05	39,84	0,92	4,92
	1,00	1,33	2,38	1,09	44,08	1,05	4,06
	0,71	1,03	2,03	1,25	49,26	1,39	4,63
	0,88	1,01	2,31	1,06	56,34	1,49	5,95
	0,93	0,82	2,22	1,08	63,13	1,49	7,74
	0,82	0,00	2,00	1,04	100,00	2,45	Infinito

#### 4.3.6. REFERENCIAS

- [1] García, T. (2004). Caracterización termogravimétrica de biomasa lignocelulósica. Proyecto Fin de Carrera nº 04-10-200542. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad de Castilla-La Mancha.
- [2] Lapuerta, M., Hernández, J.J., Pazo, A., López, J. (2008). Gasification and co-gasification of biomass wastes: effect of the biomass origin and the gasifier operating conditions. Fuel Processing Technology 89, 828-837.
- [3] Lapuerta, M., Hernández, J.J., Rodríguez, J. (2007). Comparison between the kinetics of devolatilisation of forestry and agricultural wastes from the middle-south regions of Spain. Biomass and Bioenergy 31, 13-19.
- [4] CEN-TS 15104. (2005). Solid biofuels - Determination of total content of carbon, hydrogen and nitrogen – Instrumental methods.
- [5] CEN-TS 15289. (2006) Solid biofuels – Determination of total content of sulphur and chlorine.
- [6] UNE 164001 EX. (2005). Biocombustibles sólidos. Método para la determinación del poder calorífico.
- [7] Pazo, A. (2008). Caracterización de la biomasa como combustible. Ponencia del Máster de Energías Renovables y Eficiencia Energética. Universidad de Castilla- La Mancha.
- [8] Lapuerta, M., Hernández, J.J., Rodríguez, J. (2004). Kinetics of devolatilisation of forestry wastes from thermogravimetric analysis. Biomass and Bioenergy 27, 385-391.
- [9] Vamvuka D., Kakaras E., Kastanaki E. y Grammelis P. (2003). Pyrolysis characteristics and kinetics of biomass residual mixtures with lignite. Fuel 82, 1949-1960.
- [10] HM Associates, Inc., Princeton Energy Resources International, LLC and TFB Consulting for US DOE, Office of Fossil Energy and Office of Coal and Power Systems. (2003). Assessment of the commercial potential for small gasification combined cycle and fuel cell systems. Phase II Final draft report. Obtenido de [http://www.perihq.com/documents/Gasification-PhaseII-final-report\\_4-10-03.PDF](http://www.perihq.com/documents/Gasification-PhaseII-final-report_4-10-03.PDF)

# CAPÍTULO V. RESULTADOS OBTENIDOS

# Índice Detallado

	Contenido	Pág.
5.1.	RESULTADOS EXPERIMENTALES	74
5.1.1.	Efectos en gases productos por la adición de vapor	74
5.1.2.	Efectos en gases productos por la temperatura de operación	86
5.1.3.	Efectos en gases productos por el tiempo de residencia	90
5.1.4.	Efectos en gases productos por el dosado relativo de gasificación	94
5.1.5.	Efectos en gases productos por el ratio S/B	101
5.2.	RESULTADOS TEÓRICOS DE LA EVALUACIÓN EXERGÉTICA DE LA BIOMASA	110
5.3.	REFERENCIAS	116

	Listado de figuras	Pág.
Figura 5.1.	% Especies Combustibles Vs % de vapor	74
Figura 5.2	Contorno $H_2$ Vs % de vapor y Frg.	75
Figura 5.3.	Contorno CO Vs % de vapor y Frg	76
Figura 5.4.	(a) $PCI_{gas}$ Vs % vapor. (b) GY Vs % vapor. (c) % CGE Vs % vapor	77
Figura 5.5.	Contorno $PCI_{gas}$ Vs % de vapor y Frg	78
Figura 5.6.	Contorno GY Vs % de vapor y Frg	79
Figura 5.7.	Contorno CGE Vs % de vapor y Frg	79
Figura 5.8.	Razón entre especies Vs % vapor	80
Figura 5.9.	Contorno $H_2/CO$ Vs % de vapor y Frg	81
Figura 5.10.	Contorno $CO/CO_2$ Vs % de vapor y Frg	82
Figura 5.11.	Contorno $CH_4/H_2$ Vs % de vapor y Frg.	82
Figura 5.12.	Contorno $H_2/CO_2$ Vs % de vapor y Frg	83
Figura 5.13	% productos formados Vs % vapor	84
Figura 5.14	% Especies combustibles Vs Temperatura	85
Figura 5.15	(a) $PCI_{gas}$ Vs Temperatura. (b) GY Vs Temperatura y (c) %CGE Vs Temperatura	85
Figura 5.16	Razón entre especies Vs Temperatura	85
Figura 5.17	% Especies combustibles Vs Temperatura	87
Figura 5.18	(a) $PCI_{gas}$ Vs Temperatura. (b) GY Vs Temperatura y (c) %CGE Vs Temperatura	88
Figura 5.19	Razón entre especies Vs Temperatura.	89
Figura 5.20	% especies combustibles Vs Tiempo de residencia.	91
Figura 5.21	(a) $PCI_{gas}$ Vs Tiempo de residencia. (b) GY Vs Tiempo de residencia y (c) %CGE Vs Tiempo de residencia.	92
Figura 5.22	Razón entre especies Vs tiempo de residencia	94
Figura 5.23	% de especies Vs Frg.	95
Figura 5.24	(a) % CGE Vs Frg. (b) GY Vs Frg. (c) $PCI$ Vs Frg.	96
Figura 5.25	Razón entre especies Vs Frg.	98
Figura 5.26	% Productos Vs Frg	99
Figura 5.27	Análisis inmediato Vs Frg.	100
Figura 5.28	Poder calorífico Vs Frg	100
Figura 5.29	Humedad Vs Frg.	101
Figura 5.30	% vol. gases productos Vs Ratio S/B	102
Figura 5.31	Contorno $H_2$ Vs Ratio S/B y Frg.	103



### Listado de figuras

		Pág.
<b>Figura 5.32</b>	Contorno CO Vs Ratio S/B y Frg.	103
<b>Figura 5.33</b>	(a) % CGE Vs Ratio S/B. (b) GY Vs Ratio S/B. (c) PCI Vs Ratio S/B	104
<b>Figura 5.34</b>	Contorno PCIGas con él Ratio S/B y Frg	106
<b>Figura 5.35</b>	GY con él Ratio S/B y Frg	106
<b>Figura 5.36</b>	CGE con él Ratio S/B y Frg	106
<b>Figura 5.37</b>	Razón de concentración de especies Vs Ratio S/B	107
<b>Figura 5.38</b>	Contorno H <sub>2</sub> /CO con él Ratio S/B y Frg	109
<b>Figura 5.39</b>	Contorno CO/CO <sub>2</sub> con él Ratio S/B y Frg	109
<b>Figura 5.40</b>	Contorne CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> con él Ratio S/B y Frg	109
<b>Figura 5.41</b>	Contorno H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub> con él Ratio S/B y Frg	110
<b>Figura 5.42</b>	Variación de la composición de gas producto en función de la temperatura a presiones de 1bar y 10 bares a) de los residuos de la palma africana y b) el orujo lavado de uva	110
<b>Figura 5.43</b>	Variación de la composición de gas producto en función del ER a presiones de 1bar y 10 bares a) de los residuos de la palma africana y b) el orujo lavado de uva.	112
<b>Figura 5.44</b>	Eficiencias de primera ley y exergética a distintas temperaturas a presiones de 1bar y 10 bares a) de los residuos de la palma africana y b) el orujo lavado de uva.	113
<b>Figura 5.45</b>	Eficiencias de primera ley y exergéticas a distintos valores de Equivalente Ratio a presiones de 1 y 10 bares a) de los residuos de la palma africana y b) del orujo lavado de uva.	113
<b>Figura 5.46</b>	Superficie respuesta de la eficiencia energética a distintos valores de ER y Temperaturas a) de los residuos de la palma africana y b) del orujo lavado de uva	114
<b>Figura 5.47</b>	Superficie respuesta de la eficiencia exergética a distintos valores de ER y Temperaturas a) de los residuos de la palma africana y b) del orujo lavado de uva	114
<b>Figura 5.48</b>	Superficie respuesta del poder calorífico inferior del gas producto a distintos valores de ER y Temperaturas a) de los residuos de la palma africana y b) del orujo lavado de uva	115

### Listado de tablas

		Pág.
<b>Tabla 5.1.</b>	Resultados efecto de la adición de vapor a la composición del gas producto	74
<b>Tabla 5.2.</b>	Análisis estadístico al gas producto Vs % de vapor.	75
<b>Tabla 5.3.</b>	Resultados efecto de la adición de vapor a las propiedades del gas producto.	76
<b>Tabla 5.4.</b>	Análisis estadístico a las propiedades del gas producto Vs % de vapor.	77
<b>Tabla 5.5.</b>	Resultados efecto de la adición de vapor a las razón entre especies del gas producto	80
<b>Tabla 5.6.</b>	Análisis estadístico a la adición de apor a la razón de las especies en el gas producto	81
<b>Tabla 5.7.</b>	Resultados efecto de la adición de vapor a la formación de productos	83
<b>Tabla 5.8.</b>	Análisis estadístico a la adición de vapor a la formación de productos	86
<b>Tabla 5.9.</b>	Resultados de la variación de la temperatura a la composición del gas	86
<b>Tabla 5.10</b>	Análisis estadístico al gas producto Vs Temperatura	87
<b>Tabla 5.11</b>	Resultados de la variación de la temperatura a las propiedades del	88

	<b>Listado de tablas</b>	<b>Pág.</b>
	gas producto	
<b>Tabla 5.12</b>	Análisis estadístico a las propiedades del gas producto Vs Temperatura	89
<b>Tabla 5.13</b>	Resultados de la variación de la temperatura a la razón entre especies del gas producto	89
<b>Tabla 5.14</b>	Análisis estadístico de la variación de la temperatura a la razón de las especies en el gas producto	90
<b>Tabla 5.15</b>	Resultados tiempo de residencia a la composición del gas	91
<b>Tabla 5.16</b>	Análisis estadístico al gas producto Vs Tiempo de Residencia	91
<b>Tabla 5.17</b>	Resultados de la variación del tiempo de residencia a las propiedades del gas producto	92
<b>Tabla 5.18</b>	Análisis estadístico a las propiedades del gas producto Vs Tiempo de residencia	93
<b>Tabla 5.19</b>	Resultados de la variación del tiempo de residencia a la razón entre especies del gas producto	93
<b>Tabla 5.20</b>	Análisis estadístico de la variación de la temperatura a la razón de las especies en el gas producto	94
<b>Tabla 5.21</b>	Resultados efecto del Frg a la composición del gas producto.	95
<b>Tabla 5.22</b>	Análisis estadístico al gas producto Vs Frg	95
<b>Tabla 5.23</b>	Resultados de la variación del Frg a las propiedades del gas producto	96
<b>Tabla 5.24</b>	Análisis estadístico a las propiedades del gas producto Vs Frg	97
<b>Tabla 5.25</b>	Resultados efecto del Frg a la razón entre especies del gas producto.	98
<b>Tabla 5.26</b>	Análisis estadístico del Frg a la razón de las especies en el gas producto.	99
<b>Tabla 5.27</b>	Resultados efecto de la adición de vapor a la formación de productos	99
<b>Tabla 5.28</b>	Análisis estadístico del Frg a la formación de productos	101
<b>Tabla 5.29</b>	Resultados efecto de Ratio S/B a la composición del gas producto	102
<b>Tabla 5.30</b>	Análisis estadístico al gas producto Vs % de vapor.	102
<b>Tabla 5.31</b>	Resultados efecto Ratio S/B a las propiedades del gas producto.	104
<b>Tabla 5.32</b>	Análisis estadístico a las propiedades del gas producto Vs Ratio S/B.	104
<b>Tabla 5.33</b>	Resultados efecto del Ratio S/B a la razón entre especies del gas producto	107
<b>Tabla 5.34</b>	Análisis estadístico al Ratio S/B Vs la razón de las especies en el gas producto	108
<b>Tabla 5.35</b>	Análisis elemental de la biomasa modelada	111

## 5.1. RESULTADOS EXPERIMENTALES

### 5.1.1. Efectos en gases productos por la adición de vapor

La tabla 5.1 y la figura 5.1. Recogen los resultados en cuanto al porcentaje en volumen de los gases productos. Se puede ver que en general, la adición de vapor tiene un efecto positivo en la generación de especies combustibles, en concordancia con las conclusiones de [1]. El porcentaje en volumen crece desde un 9,93% cuando se gasifica con solo aire hasta un 73,59 % cuando el agente gasificante es netamente vapor. El CO presenta un crecimiento prácticamente lineal desde 6,8% a 31,37 % pasando de aire puro a vapor puro. En cambio, el H<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>, sufren un crecimiento no lineal, el primero, de 2,09% a 18,94% y, el segundo, de 0,8% a 13,28% cuando se tiene 100% de contenido de vapor en el agente gasificante, lo que concuerda con los resultados obtenidos por [2]. El incremento de CH<sub>4</sub> y otros hidrocarburos puede deberse a la reducción de la biomasa en la etapa de desvolatilización, la cual no es compensada por el consumo de CH<sub>4</sub> en las reacciones de reformado. Por otra parte, la producción de CH<sub>4</sub> vía hidrogasificación o metanación (ambas reacciones exotérmicas) son favorecidas por las menores temperaturas dentro del tanque causadas a su vez, por el menor contenido de aire dentro del agente gasificante.

Tabla 5. 1. Resultados efecto de la adición de vapor a la composición del gas producto

% vapor	N <sub>2</sub> (% vol)	H <sub>2</sub> (% vol)	CO (% vol)	CH <sub>4</sub> (% vol)	CO <sub>2</sub> (% vol)	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (% vol)	Total especies combustibles (% vol)
0.00	70.66	2.09	6.80	0.80	17.95	0.24	9,93
23.88	60.72	6.20	11.80	2.39	17.42	0.61	21,00
25.48	56.57	5.89	13.59	3.31	17.83	1.30	24,09
33.61	55.99	5.16	16.89	3.54	15.27	1.11	26,70
36.17	54.02	7.75	17.64	3.82	14.89	1.08	30,29
39.84	53.63	6.38	16.85	3.89	16.53	1.29	28,41
44.08	52.59	8.37	18.12	4.03	15.04	1.05	31,57
49.26	49.02	8.86	18.25	4.81	16.78	1.54	33,46
56.34	49.00	8.92	19.01	4.71	15.65	1.93	34,57
63.13	45.81	9.66	20.32	5.45	14.99	2.66	38,09
100.00	1.23	18.94	31.37	13.28	25.13	10.00	73,59

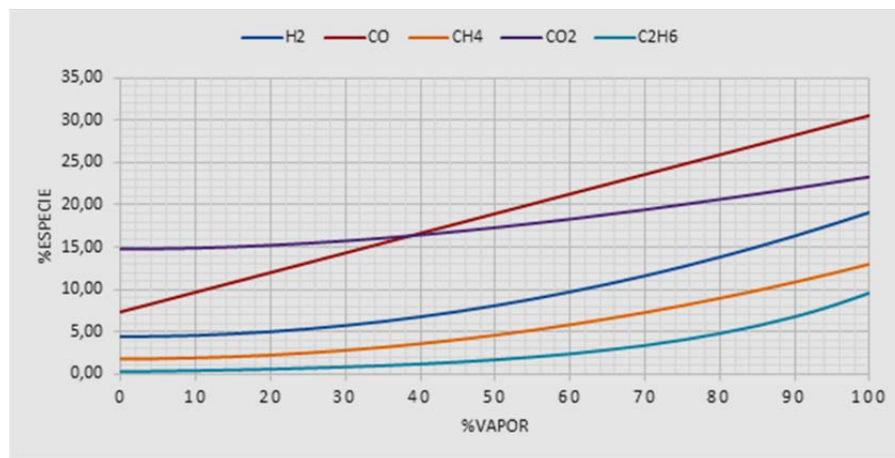


Figura 5. 1. % Especies Combustibles Vs % de vapor.

Tabla 5.2. Análisis estadístico al gas producto Vs % de vapor.

Variable analizada	Modelo ajustado	Valor-P	Coefficiente de correlación	R-Cuadrada [%]	Error estándar
N <sub>2</sub>	$65,0 - 0,006190(\% \text{ vap})^2$	0,000	-0,981023	96,2405	3,57193
H <sub>2</sub>	$4,444 + 0,00146(\% \text{ vap})^2$	0,000	0,965714	93,2604	1,15281
CO	$7,3793 + 0,2320(\% \text{ vap})$	0,000	0,980258	96,0905	1,26138
CH <sub>4</sub>	$1,822 + 0,001119(\% \text{ vap})^2$	0,000	0,98237	96,5051	0,621879
CO <sub>2</sub>	$\sqrt{(219,057 + 0,03252(\% \text{ vap})^2)}$	0,0173	0,727491	59,375	2,11275
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	$e^{-1,1878 + 0,0345(\% \text{ vap})}$	0,000	0,968316	93,7637	0,239929

La tabla 5.2, obtenida del análisis realizado en Statgraphics Centurion, muestra los resultados ajustados a un modelo de regresión, puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las especies combustibles y el % vapor con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo ajustado es superior a 93,2604 % de la variabilidad en cada una de las especies combustibles. El coeficiente de correlación es mayor a 0,965714, indicando una relación relativamente fuerte entre las variables. Así mismo, el error estándar del estimado indica que la desviación estándar de los residuos va de 0,239929 a 1,26138, por lo cual este valor puede usarse para construir límites de predicción para futuros ensayos de gasificación con adición de vapor.

En efecto se puede estudiar la generación de Hidrogeno (H<sub>2</sub>) y Monóxido de Carbono (CO), desde una evaluación de la adición de vapor y el dosado relativo de gasificación, que permite establecer un modelo de regresión como se nota en las ecuaciones 5.1 y 5.2 con el estadístico R-Cuadrada superior a 88,6234% y 88,5252%, así como un error estándar del estimado que valora la desviación de los residuos de 0,937559 y 1,3807 respectivamente, generando un parámetro de predicción, como se nota en las figuras 5.2 y 5.3, asociado con la relación H<sub>2</sub>/CO, como parámetro para la obtención de gas de síntesis.

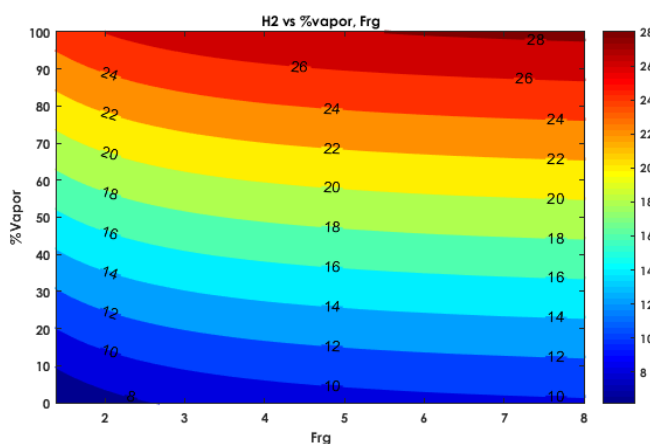


Figura 5.2. Contorno H<sub>2</sub> Vs % de vapor y Frg.

**Modelo de regresión del H<sub>2</sub> con el % de vapor y Frg**

$$H_2 = -3,23705 + 0,12188(\% \text{ vap}) + e^{\left(1,69219 + \frac{0,159636}{Frg}\right)} \quad (\text{Eq. 5.1})$$

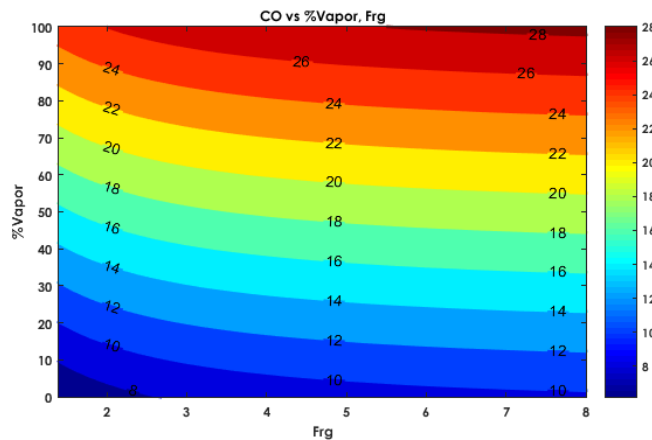


Figura 5.3. Contorno CO Vs % de vapor y Frg.

#### Modelo de regresión del CO con el % de vapor y Frg

$$CO = e^{\left(2,29788 - \frac{0,836107}{Frg}\right)} + 0,722711 + 0,187262(\%vap) \quad (Eq. 5.2)$$

En referencia al  $CO_2$ , llama la atención el decaimiento en el porcentaje en volumen cuando la composición del agente gasificante es cercana a 50% aire y 50% vapor, esto puede presentarse debido al equilibrio entre las reacciones que producen  $CO_2$  (WGS y combustión) y las que lo consumen (Boudouard). La figura 5.4 y tabla 5.3 presentan las propiedades del gas producto en relación al contenido de vapor.

Tabla 5.3. Resultados efecto de la adición de vapor a las propiedades del gas producto.

% vapor	PCI <sub>gas</sub> (MJ/Nm <sup>3</sup> )	PCI <sub>gas</sub> (MJ/kg)	GY (m <sup>3</sup> /kg daf)	GY (kg/kg daf)	CGE (%)
0.00	1.53	1.23	3.19	3.96	24.04
23.88	3.40	2.84	2.25	2.69	37.86
25.48	4.36	3.66	1.46	1.74	31.46
33.61	4.66	3.97	1.69	1.98	38.91
36.17	5.11	4.42	2.35	2.72	59.38
39.84	5.02	4.28	1.60	1.87	39.64
44.08	5.29	4.61	2.16	2.48	56.54
49.26	5.95	5.16	1.85	2.13	54.41
56.34	6.27	5.48	1.88	2.15	58.32
63.13	7.24	6.43	1.65	1.85	58.85
100.00	17.08	15.89	0.55	0.59	46.72

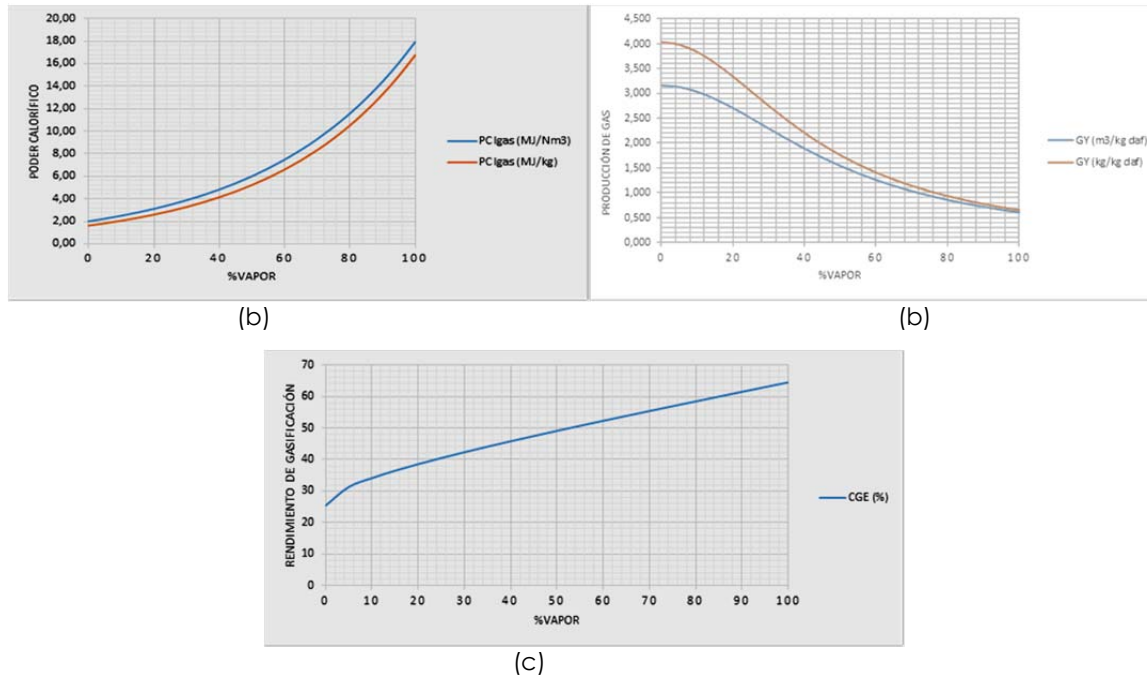


Figura 5. 4. (a) PCI gas Vs % vapor. (b) GY Vs % vapor. (c) % CGE Vs % vapor.

Como era de esperarse, un incremento en el porcentaje de especies combustibles generadas deriva en un crecimiento del poder calorífico del gas producto (1,23 MJ/kg a 15,89 MJ/kg con agente gasificante de vapor). La tendencia opuesta ocurre con el GY, la cual decrece de 3,96 kg daf/kg hasta 0,59 kg daf/daf; esto puede deberse a varias razones como menor conversión de carbón y/o el exceso de agua en el proceso debido al exceso de vapor que no toma parte de las reacciones de gasificación. Estos resultados concuerdan con los publicados por [2] que afirma que ante el exceso de vapor, el Gas Yield y la conversión de carbón disminuían[3][4].

La tendencia opuesta entre GY y el poder calorífico puede deberse a la existencia de un máximo en la eficiencia en frío del gas producto, que se observa cuando el agente gasificante posee entre 50% y 70% de porcentaje de vapor, de acuerdo a la figura 5.4. De hecho, se observa que en dicho intervalo existe un equilibrio entre el poder calorífico y GY, por lo cual puede afirmarse que es un intervalo óptimo para la gasificación con mezcla entre vapor y aire.

Tabla 5.4. Análisis estadístico a las propiedades del gas producto Vs % de vapor.

Variable analizada	Modelo ajustado	Valor-P	Coefficiente de correlación	R-Cuadrada [%]	Error estándar
PCI <sub>gas</sub> (MJ/Nm <sup>3</sup> )	$e^{0,6989+0,02186(\% \text{ vap})}$	0,000	0,972754	94,6251	0,140453
PCI <sub>gas</sub> (MJ/kg)	$e^{0,4891 + 0,02328(\% \text{ vap})}$	0,000	0,974572	94,9791	0,144305
GY (m <sup>3</sup> /kg daf)	$\frac{1}{0,3164 + 0,0001327(\% \text{ vap})^2}$	0,0002	0,915799	83,8689	0,169904
GY (kg/kg daf)	$\frac{1}{0,2480 + 0,0001282(\% \text{ vap})^2}$	0,0078	0,926607	85,8601	0,151967
CGE (%)	$e^{-1,19622 + 0,0345503(\% \text{ vap})}$	0,0078	0,779728	60,7976	0,207393



La tabla 5.4, obtenida del análisis realizado en Statgraphics Centurion, muestra los resultados ajustados a un modelo de regresión, puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las propiedades del gas producto y el % vapor con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo ajustado entre 60,7976% a 94,9791% de la variabilidad en cada una de las propiedades del gas producto. El coeficiente de correlación es mayor a 0,779728, indicando una relación relativamente fuerte entre las variables. Así mismo, el error estándar del estimado indica que la desviación estándar de los residuos va de 0,140453 a 0,207393, por lo cual este valor puede usarse para construir límites de predicción para futuros ensayos de gasificación con adición de vapor, en la determinación de las propiedades del gas producto.

En efecto se puede estudiar el poder calorífico inferior del gas (PCI), la producción de gas (GY) y el rendimiento de la gasificación (CGE), desde una evaluación de la adición de vapor y el dosado relativo de gasificación, que permite establecer un modelo de regresión como se nota en las ecuaciones 5.3, 5.4 y 5.5 con el estadístico R-Cuadrada superior a 98,6897%, 93,6546% y 86,2194 %, así como un error estándar del estimado que valora la desviación de los residuos de 0,247966, 0,249967 y 7,25629 respectivamente, generando un parámetro de predicción, como se nota en las figuras 5.5, 5.6 y 5.7, asociado con las propiedades energéticas del gas.

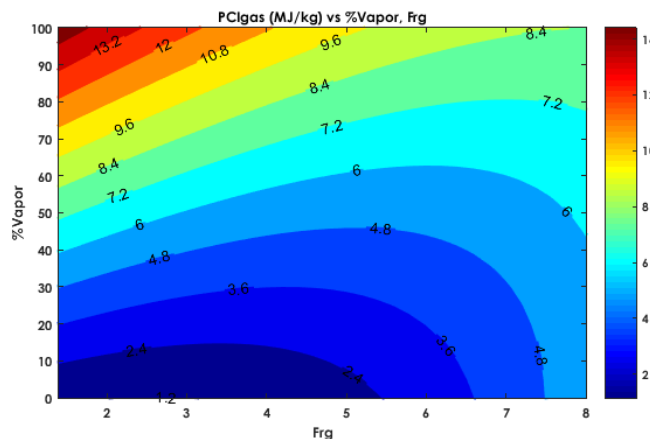


Figura 5.5. Contorno  $PCI_{gas}$  Vs % de vapor y  $Frg$ .

#### Modelo de regresión del $PCI_{gas}$ con el % de vapor y $Frg$

$$PCI_{gas} = -0,785035(Frg) + 0,126881(\%vap) - 0,0164973(\%vap)(Frg) + 0,15124(Frg^2) + 0,00033265(\%vap^2) + 2,17242 \quad (Eq. 5.3)$$

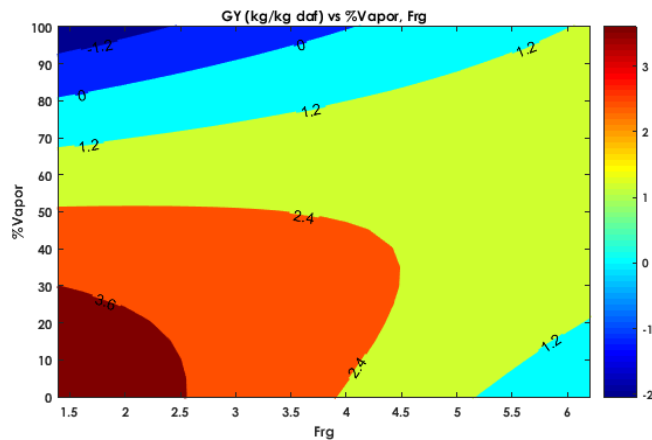


Figura 5.6. Contorno GY Vs % de vapor y Frg.

#### Modelo de regresión del GY con él % de vapor y Frg

$$\text{GY} = -0,0395044(\% \text{vapor}) - 0,706152(\text{Frg}) + 0,016104(\text{Frg})(\% \text{vapor}) - 0,00048793(\% \text{vapor}^2) - 0,0279758(\text{Frg}^2) + 5,578 \quad (\text{Eq. 5.4})$$

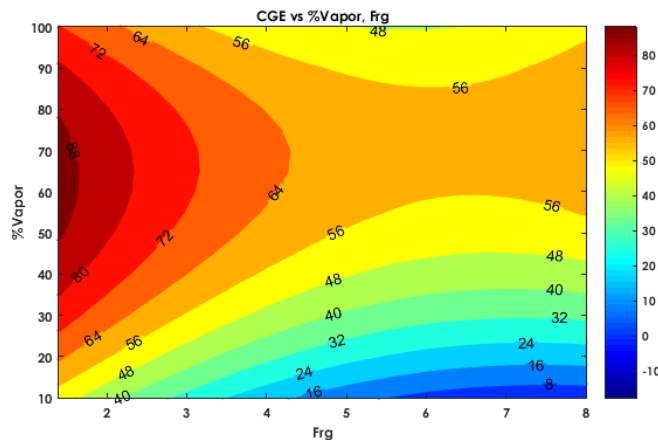


Figura 5.7. Contorno CGE Vs % de vapor y Frg.

#### Modelo de regresión del CGE con él % de vapor y Frg

$$\text{CGE} = 1,70055(\% \text{vapor}) - 20,2332(\text{Frg}) + 0,0519948(\text{Frg})(\% \text{vapor}) - 0,0140463(\% \text{vapor}^2) + 1,30219(\text{Frg}^2) + 60,9477 \quad (\text{Eq. 5.5})$$

La figura 5.8 y la tabla 5.5 muestran información acerca del comportamiento de las razones entre los gases productos [mol/mol]. Dicha gráfica provee información acerca de la manera en que se desarrollan las reacciones de gasificación. En primer lugar, se observa que los ratios  $\text{H}_2/\text{CO}$  y  $\text{H}_s/\text{CO}_s$  crecen de forma no-lineal según crezca la cantidad de vapor, lo que indica que la adición de vapor promueve las reacciones de reformado de cenizas y alquitranes, además de la water-gas shift debido a una mayor cantidad de vapor disponible para reaccionar. En particular, el ratio  $\text{H}_s/\text{CO}$  pasó de



0,31 (vapor 0%) a 0,6 (vapor 100%); en cambio, el ratio  $H_2/CO_2$  aumentó de 0,12 a 0,75%.

Tabla 5.5. Resultados efecto de la adición de vapor a la razón entre especies del gas producto.

% vapor	$H_2/CO$	$CO/CO_2$	$CH_4/H_2$	$H_2/CO_2$
0.00	0.31	0.38	0.38	0.12
23.88	0.53	0.68	0.38	0.36
25.48	0.43	0.76	0.56	0.33
33.61	0.31	1.11	0.69	0.34
36.17	0.44	1.18	0.49	0.52
39.84	0.38	1.02	0.61	0.39
44.08	0.46	1.20	0.48	0.56
49.26	0.49	1.09	0.54	0.53
56.34	0.47	1.22	0.53	0.57
63.13	0.48	1.36	0.56	0.64
100.00	0.60	1.25	0.70	0.75

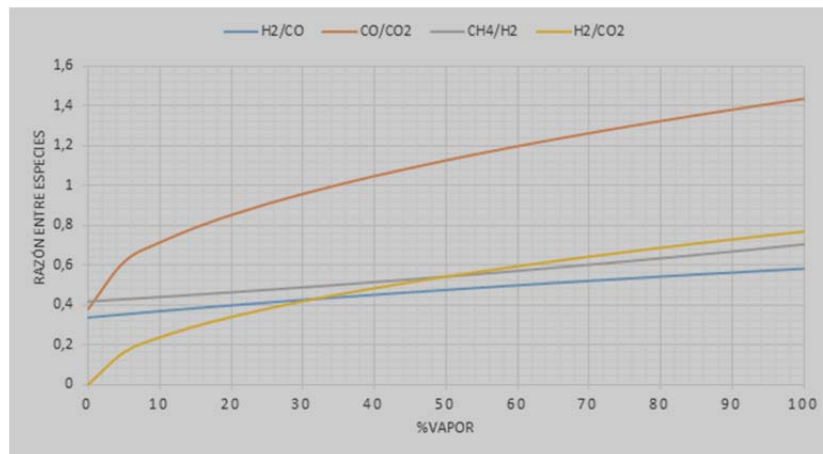


Figura 5.8. Razón entre especies Vs % vapor.

Por otra parte, el ratio  $CO/CO_2$  crece con la adición de vapor pero cuando se estabiliza por encima de 1.2 cuando se gasifica a partir de 50% de contenido de vapor. Esto puede deberse al incremento de las reacciones WGS que equilibran la reacción de Boudouard que es la principal generadora de CO. El ratio  $CH_4/H_2$  presenta un leve incremento en el rango de variación del contenido de vapor, el cual se ve acelerado a partir de 50% de vapor. Este comportamiento tiene razón en el favorecimiento de la reacción de reformado de  $CH_4$  y en el empeoramiento de la combustión producida en la etapa de gasificación (Debido a la ausencia de aire disponible), lo que afecta negativamente a la temperatura de reacción dentro del gasificador y además, favorece la producción de  $CH_4$  vía metanación o gasificación.

La tabla 5.6, obtenida del análisis realizado en Statgraphics Centurion, muestra los resultados ajustados a un modelo de regresión, puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las razones de las especies y el % vapor con un nivel de confianza del 95,0%.

Tabla 5.6. Análisis estadístico a la adición de vapor a la razón de las especies en el gas producto.

Variable analizada	Modelo ajustado	Valor-P	Coefficiente de correlación	R-Cuadrada [%]	Error estándar
H <sub>2</sub> /CO	$\sqrt{(0,113132 + 0,00225425(\% \text{ vap})}$	0,0103	0,779728	58,2101	0,0545633
CO/CO <sub>2</sub>	$0,379804 + 0,105535\sqrt{(\% \text{ vap})}$	0,0006	0,88775	78,81	0,151868
CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub>	$e^{-0,874449+0,00523907(\% \text{ vap})}$	0,0262	0,693477	48,091	0,155491
H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>	$\sqrt{(-0,00354363 + 0,00594223(\% \text{ vap})}$	0,0000	0,964195	92,9671	0,0466889

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo ajustado entre 48,091% a 92,9671% de la variabilidad en cada una de las razones de las especies en el gas producto. El coeficiente de correlación es mayor a 0,693477, indicando una relación relativamente fuerte entre las variables. Así mismo, el error estándar del estimado indica que la desviación estándar de los residuos va de 0,0466889 a 0,155491, por lo cual este valor puede usarse para construir límites de predicción para futuros ensayos de gasificación con adición de vapor, en la determinación del comportamiento de las reacciones en las propiedades del gas producto.

En efecto se puede estudiar las razones H<sub>2</sub>/CO, CO/CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>, desde una evaluación de la adición de vapor y el dosado relativo de gasificación, que permite establecer un modelo de regresión como se nota en las ecuaciones 5.6, 5.7, 5.8 y 5.9 con el estadístico R-Cuadrada superior a 32,4891%, 90,8111%, 56,991% y 93,6772 %, así como un error estándar del estimado que valora la desviación de los residuos de 0,0750061, 0,136864, 0,094104 y 0,0588418 respectivamente, generando un parámetro de predicción, como se nota en las figuras 5.9, 5.10, 5.11 y 5.12, asociado con la manera en que se desarrollan las reacciones de gasificación de lecho arrastrado con adición de vapor.

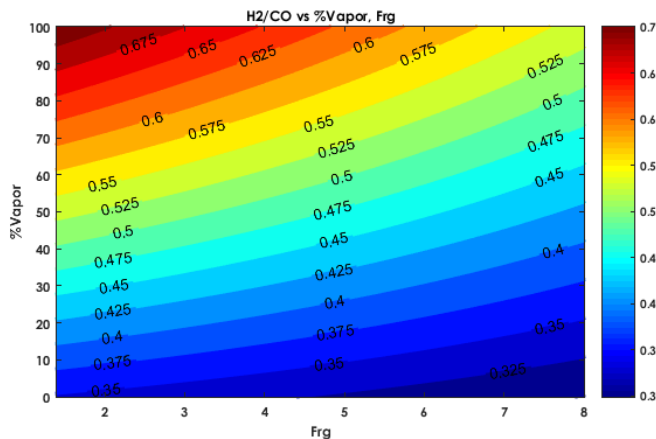


Figura 5.9. Contorno H<sub>2</sub>/CO Vs % de vapor y Frg.

Modelo de regresión de la razón H<sub>2</sub>/CO con el % de vapor y Frg

$$\text{H}_2/\text{CO} = 0,00399648(\% \text{ vap}) - 0,00717113(\text{Frg}) - 0,000201057(\text{Frg})(\% \text{ vap}) + 0,356691 \quad (\text{Eq. 5.6})$$

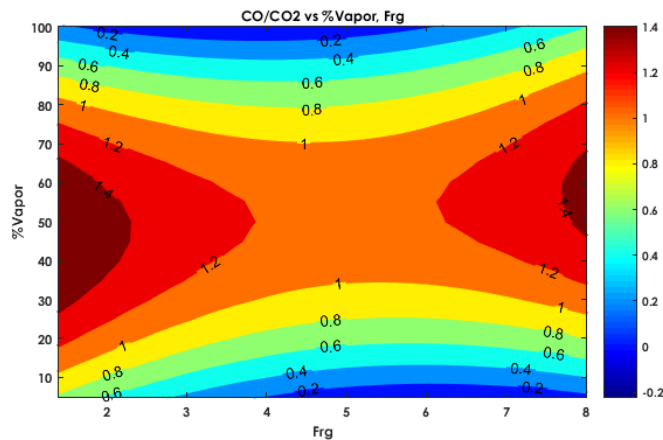


Figura 5.10. Contorno CO/CO<sub>2</sub> Vs % de vapor y Frg.

Modelo de regresión de la razón CO/CO<sub>2</sub> con él % de vapor y Frg

$$\text{CO/CO}_2 = 0,0426211(\% \text{vapor}) - 0,405027(\text{Frg}) + 0,00157481(\text{Frg})(\% \text{vapor}) + 0,0322902(\text{Frg}^2) - 0,000482058(\% \text{vapor}^2) + 1,05101 \quad (\text{Eq. 5.7})$$

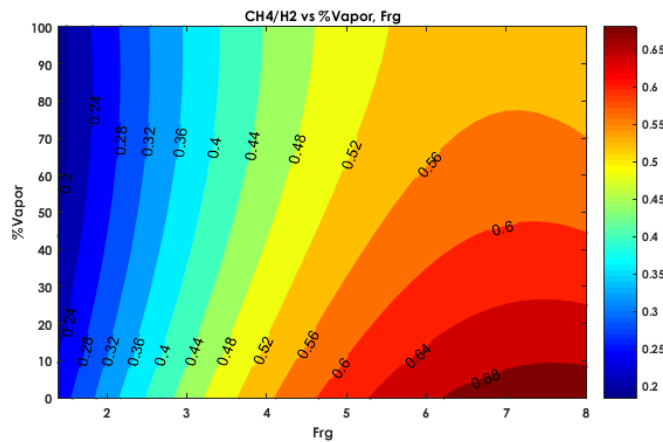


Figura 5.11. Contorno CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> Vs % de vapor y Frg.

Modelo de regresión de la razón CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> con él % de vapor y Frg

$$\frac{\text{CH}_4}{\text{H}_2} = -0,00152151(\% \text{vapor}) + 0,175095(\text{Frg}) - 0,00015741(\text{Frg})(\% \text{vapor}) + 0,0000106725(\% \text{vapor}^2) - 0,0114293(\text{Frg}^2) + 0,0330248 \quad (\text{Eq. 5.8})$$

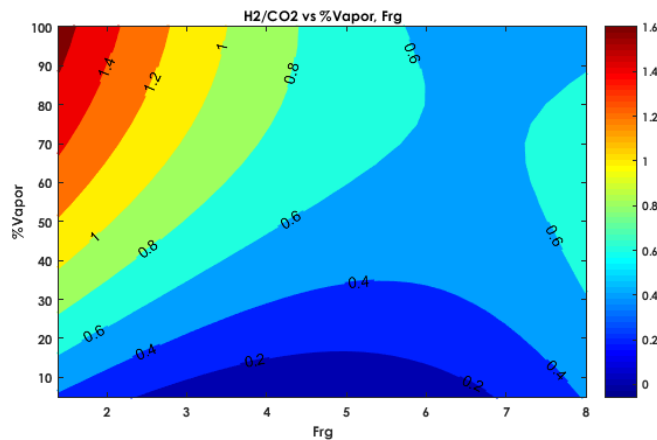


Figura 5.12. Contorno  $H_2/CO_2$  Vs % de vapor y Frg.

#### Modelo de regresión de la razón $H_2/CO_2$ con el % de vapor y Frg

$$H_2/CO_2 = 0,0253163(\%vap) - 0,296138(Frg) - 0,00189495(Frg)(\%vap) - 0,0000846181(\%vap^2) + 0,0332155(Frg^2) + 0,604836 \quad (Eq. 5.9)$$

La figura 5.13 y la tabla 5.7 muestran el porcentaje de distribución de los productos de la gasificación [% peso total]: Gas producto, cenizas y condensados (agua y alquitranes, principalmente). Se observa un incremento en el porcentaje de condensados con la adición de vapor, de 4,38% a 62,55% (100% de vapor), que puede deberse a la cantidad de agua en exceso que no hace parte de las reacciones de gasificación. En cambio, la fracción de gases productos decrece desde un 93,08% para gasificación con aire hasta un 16,11% cuando se gasifica solo con vapor. El Char, presenta un ligero crecimiento, de 4,38% a 12,68%, que encuentra explicación en la menor conversión de carbón debido al déficit de aire y  $O_2$ , específicamente, que se aumenta con la adición de vapor.

Tabla 5.7. Resultados efecto de la adición de vapor a la formación de productos.

% vapor	%gas	%char	%condensados
0.00	93.08	4.38	4.38
23.88	77.46	9.35	12.30
25.48	62.65	11.07	13.34
33.61	65.50	5.50	30.43
36.17	74.49	9.46	16.66
39.84	53.75	8.90	25.22
44.08	68.51	10.54	21.93
49.26	51.40	9.25	51.19
56.34	55.57	10.25	32.62
63.13	51.13	8.53	37.97
100.00	16.11	12.68	62.55

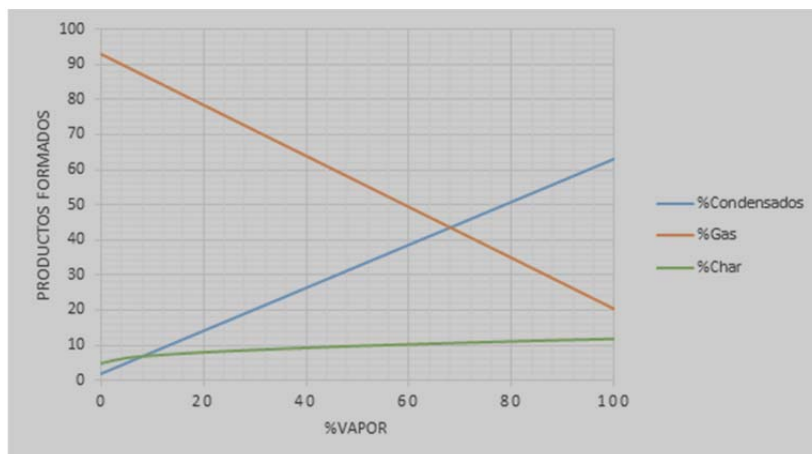


Figura 5.13. % productos formados Vs % vapor

Teniendo en cuenta todos los anteriores resultados mostrados, puede afirmarse que la gasificación de biomasa con aire y vapor, presenta un rango óptimo cuando el contenido de vapor oscila entre 40% y 70%. En estos valores, se tiene que las reacciones de combustión asociadas al aire previenen el decaimiento de la temperatura de reacción en el gasificador, a la vez que favorecen la producción de CO y CO<sub>2</sub>. El aire extiende la etapa de desvolatilización y favorece a las reacciones endotérmicas de gasificación. Por su parte, el vapor favorece las reacciones de WGS y reformados de char y alquitranes como apuntan varios autores [4][5][6][7][8]. Sin embargo, cuando se aumenta el contenido de vapor por encima de 70%, se presentan dos situaciones particulares: Por un lado, el aumento de vapor desestabiliza el equilibrio de las reacciones de reformado de vapor y WGS en beneficio hacia los productos. Por otro lado, con la disminución del aire, se perjudica a las reacciones de combustión lo que deriva en el decaimiento de la temperatura dentro del gasificador. Esta reducción de temperatura desfavorece a las reacciones endotérmicas, quitando el equilibrio de estas reacciones hacia los reactantes y favoreciendo a las reacciones exotérmicas como WGS que juega un papel predominante a medida que aumenta el contenido de vapor. El aumento de H<sub>2</sub> a medianas y bajas temperaturas mejora la producción de CH<sub>4</sub> vía hidrogasificación o metanación al consumirse parte del H<sub>2</sub> producido.

Adicionalmente como la formación del char al adicionar vapor es levemente constante, se puede notar en la figura 5.14 sus características tales como el análisis inmediato entre el 40% al 70% de la adición de vapor el carbono fijo se reduce, mostrando a su vez que aumenta el poder calorífico como lo muestra la figura 5.15 del gas producto, por ende la humedad es constante, ya que es aprovechada para la formación de especies combustibles ver figura 5.16.

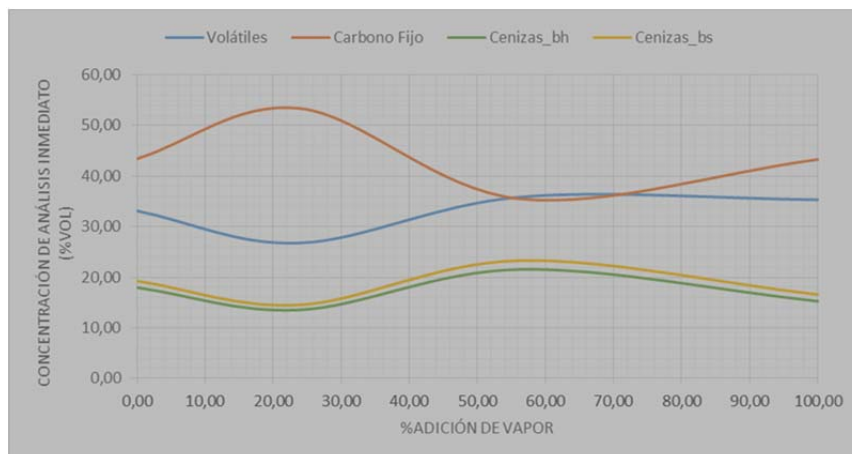


Figura 5.14. Análisis inmediato Vs % vapor.

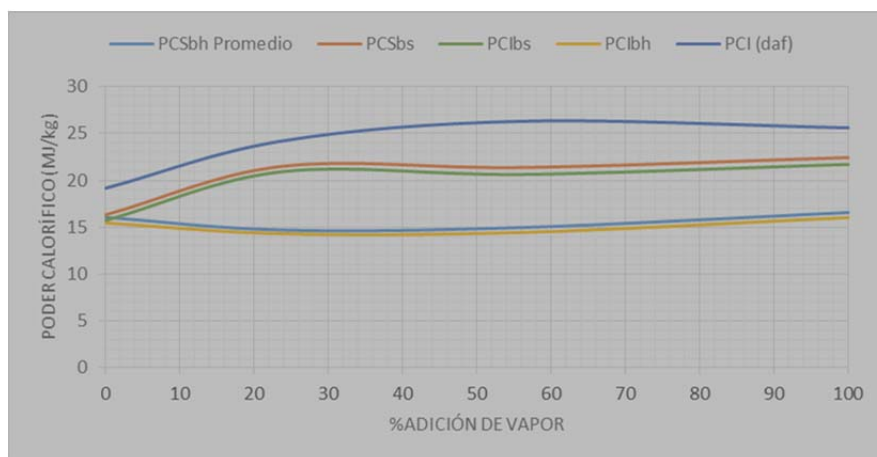


Figura 5.15. Poder calorífico Vs % vapor

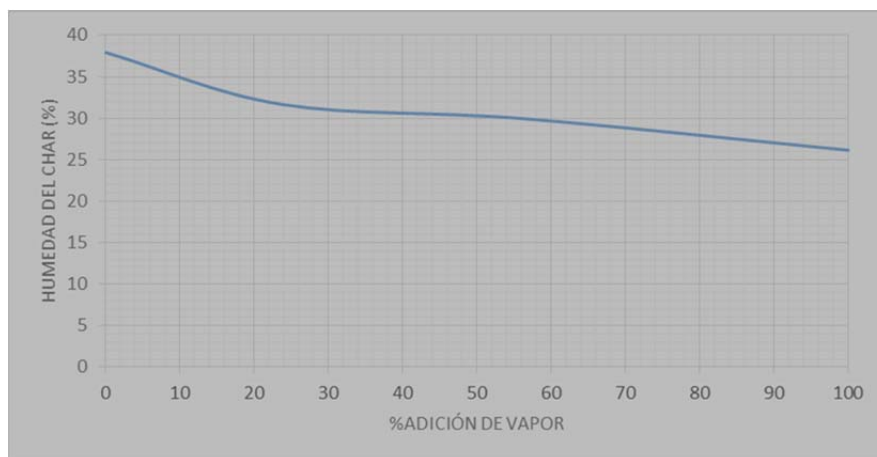


Figura 5. 16. Humedad del char Vs % vapor

La tabla 5.8, obtenida del análisis realizado en Statgraphics Centurión, muestra los resultados ajustados a un modelo de regresión, puesto que el valor-P en la tabla

ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las formación de productos y el % vapor con un nivel de confianza del 95,0%.

Tabla 5.8. Análisis estadístico a la adición de vapor a la formación de productos.

Variable analizada	Modelo ajustado	Valor-P	Coefficiente de correlación	R-Cuadrada [%]	Error estándar
%Condensados	$1,89593 + 0,612157(\% \text{ vap})$	0,0004	0,896958	80,4533	8,61967
%Gas	$92,9534 - 0,726077(\% \text{ vap})$	0,0000	-0,9527	90,7637	6,61664
%Char	$4,86626 + 0,695997\sqrt{(\% \text{ vap})}$	0,0163	0,730849	53,414	1,80386

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo ajustado entre 53,414% a 90,7637% de la variabilidad en cada una de la formación de productos en el proceso de gasificación. El coeficiente de correlación es va de -0,9527, indicando una relación relativamente fuerte entre las variables. Así mismo, el error estándar del estimado indica que la desviación estándar de los residuos va de 1,80386 a 8,61967, por lo cual este valor puede usarse para construir límites de predicción estimados para futuros ensayos de gasificación con adición de vapor, en la determinación del comportamiento de la formación de productos líquidos, sólidos y gaseosos.

### 5.1.2.Efectos en gases productos por la temperatura de operación

La figura 5.17 y la tabla 5.9 muestran la variación de la concentración de los gases productos en razón de la temperatura. Lo primero que salta a la vista, es el considerable aumento del porcentaje de H<sub>2</sub> (de 2,88% a 16,42%), el CH<sub>4</sub> se incrementa ligeramente (2,26% a 4,44%). El aumento en la tasa de desvolatilización deriva en una mayor liberación de CH<sub>4</sub> que no se ve compensado por las reacciones de reformado. El aumento de H<sub>2</sub> favorece también las reacciones productoras de CH<sub>4</sub>, tal como la Metanación e hidrogasificación, como lo indican varios autores [4][5][7]. Por otro lado, los contenidos de CO y CO<sub>2</sub> sufren un ligero aumento (15,09% a 17,27% y 12,84% a 15,33%, respectivamente) lo que corresponde a la relevancia que toman las reacciones de WGS en la composición del gas producto con la adición de vapor y el incremento de la temperatura.

Tabla 5.9. Resultados de la variación de la temperatura a la composición del gas.

T (°C)	N <sub>2</sub> (% vol)	H <sub>2</sub> (% vol)	CO (% vol)	CH <sub>4</sub> (% vol)	CO <sub>2</sub> (% vol)	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (% vol)	Total especies combustibles (% vol)
750	56,96	2,88	15,09	2,26	13,47	1,79	24,90
750	58,83	3,09	15,55	2,60	12,84	1,98	26,31
850	60,44	3,03	15,77	2,81	13,29	1,52	26,16
850	58,65	5,21	16,18	3,39	13,60	2,05	32,04
950	54,92	8,37	16,22	3,87	14,26	1,81	38,64
1050	52,59	8,37	18,12	4,03	15,04	1,05	39,94
1050	49,57	13,13	17,25	4,52	13,82	1,57	49,60
1150	45,59	16,42	17,27	4,44	15,33	0,86	55,41



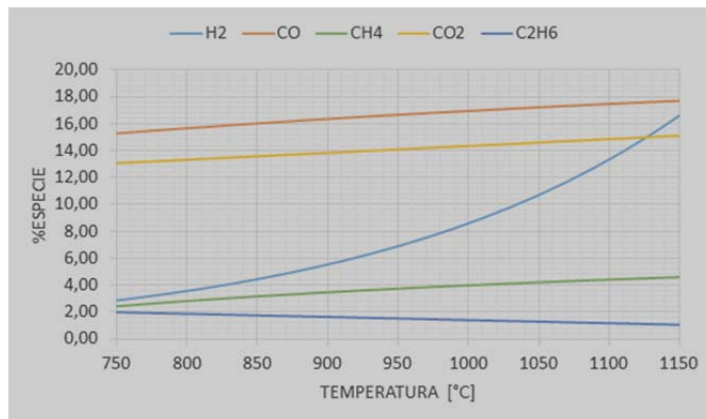


Figura 5.17. % Especies combustibles Vs Temperatura.

Por lo tanto, la gasificación con vapor-aire a altas temperaturas favorece la producción de H<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>, en particular, el contenido de H<sub>2</sub> se dispara a altas temperaturas debido principalmente a la promoción de las reacciones de reformado de vapor y WGS, en concordancia con lo propuesto por [4].

Tabla 5.10. Análisis estadístico al gas producto Vs Temperatura.

Variable analizada	Modelo ajustado	Valor-P	Coefficiente de correlación	R-Cuadrada [%]	Error estándar
N <sub>2</sub>	$69,4115 - 0,0000168204(T)^2$	0,0014	-0,915491	83,8124	2,23066
H <sub>2</sub>	$e^{-2,24463 + 0,00439486(T)}$	0,0003	0,950813	90,4046	0,230129
CO	$\frac{1}{0,0397203 + \frac{19,3109}{T}}$	0,0016	0,912489	83,2635	0,00165497
CH <sub>4</sub>	$8,64197 - \frac{4658,66}{T}$	0,0002	-0,96031	92,2195	0,258666
CO <sub>2</sub>	$9,23049 + 0,00510798(T)$	0,0039	0,880472	77,5231	0,442071
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	$3,72969 - 0,00232682(T)$	0,0147	-0,810241	65,6491	0,270525

La tabla 5.10, obtenida del análisis realizado en Statgraphics Centurion, muestra los resultados ajustados a un modelo de regresión, puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las especies combustibles y el % vapor con un nivel de confianza del 95,0%, el estadístico R-Cuadrada indica que el modelo ajustado es superior a 65,6491 % de la variabilidad en cada una de las especies combustibles. El coeficiente de correlación crece desde -0,810241, indicando una relación relativamente fuerte entre las variables. Así mismo, el error estándar del estimado indica que la desviación estándar de los residuos va de 0,00165497 a 2,23066, por lo cual este valor puede usarse para construir límites de predicción para futuros ensayos de gasificación con variación de la temperatura de gasificación.

La figura 5.18 y la tabla 5.11. Muestran como varía el poder calorífico (PCI<sub>gas</sub>), La producción de gas (GY) y el rendimiento de la gasificación (CGE), para los diferentes valores de temperatura de operación. Como puede apreciarse, el CGE sufre un aumento sustancial con respecto a la variación de temperatura. La razón puede encontrarse en la contribución que hace el aumento de contenido de H<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>. La



adición de vapor como agente gasificante a una mayor temperatura de operación derivan tanto en un aumento en el poder calorífico y la eficiencia del gas. Este mejoramiento es prueba de la incidencia de las reacciones de reformado de vapor y WGS se incrementan con la adición de vapor.

Tabla 5.11. Resultados de la variación de la temperatura a las propiedades del gas producto.

T (°C)	PCI <sub>gas</sub> (MJ/Nm <sup>3</sup> )	PCI <sub>gas</sub> (MJ/kg)	GY (m <sup>3</sup> /kg daf)	GY (kg/kg daf)	CGE (%)
750	4,15	3,68	1,64	1,85	33,70
750	4,48	3,90	1,91	1,59	30,65
850	4,28	3,65	1,81	2,13	38,39
850	5,11	4,35	1,47	1,73	37,26
950	5,48	4,77	1,74	2,00	47,13
1050	5,29	4,61	2,16	2,48	56,54
1050	6,20	5,66	1,64	1,79	50,22
1150	6,08	5,69	1,60	1,71	48,17

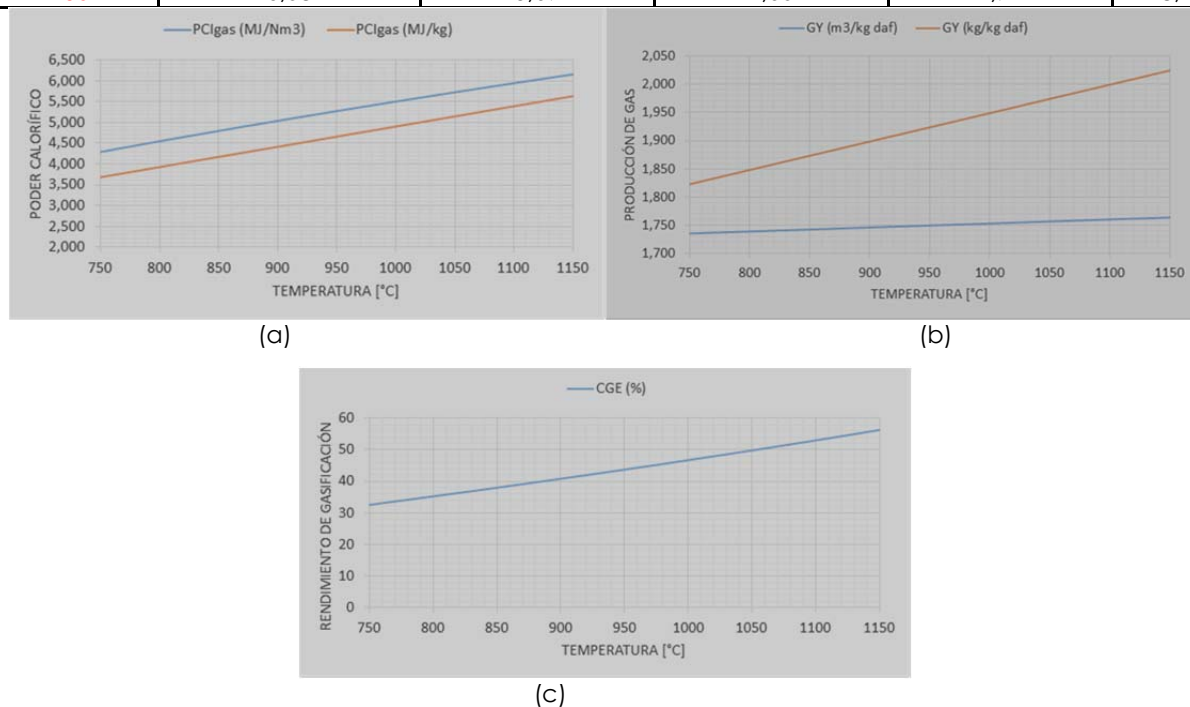


Figura 5.18. (a) PCI<sub>gas</sub> Vs Temperatura. (b) GY Vs Temperatura y (c) %CGE Vs Temperatura.

En efecto se puede estudiar el poder calorífico inferior del gas (PCI<sub>gas</sub>), la producción de gas (GY) y el rendimiento de la gasificación (CGE), desde una evaluación de la variación de la temperatura de gasificación, que permite establecer un modelo ajustado como se nota en la tabla 5.12, pero este no lleva a una forma robusta de predicción, ya que la producción de gas es poco aproximada y su R-Cuadrada oscila entre 0,244653% a 6,915%, aunque el error estándar del estimado que valora la desviación de los residuos va de 0,231044 a , 0,2977, asociado con las propiedades energéticas del gas es poco predecible manejarlo desde la temperatura del gas producto.

Tabla 5.12. Análisis estadístico a las propiedades del gas producto Vs Temperatura.

Variable analizada	Modelo ajustado	Valor-P	Coefficiente de correlación	R-Cuadrada [%]	Error estándar
$PCI_{gas}$ (MJ/Nm <sup>3</sup> )	$-3,54625 + 0,286248\sqrt{T}$	0,0029	0,892119	79,5875	0,382475
$PCI_{gas}$ (MJ/kg)	$0,028625 + 0,0048764(T)$	0,0027	0,894272	79,9722	0,392232
GY (m <sup>3</sup> /kg daf)	$1,68185 + 0,0000711887(T)$	0,9074	0,0494624	0,244653	0,231044
GY (kg/kg daf)	$1,44426 + 0,000504861(T)$	0,5292	0,262979	6,9158	0,2977
CGE (%)	$\frac{1}{-0,00645996 + \frac{27,8579}{T}}$	0,0005	0,939752	88,3134	0,00193715

Entre tanto, la figura 5.19 y la tabla 5.13. -Muestran el comportamiento de las razones entre los gases productos con respecto a la temperatura. El aumento del H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> es un indicativo del aumento de la importancia de las reacciones de reformado de vapor con la temperatura. Resulta interesante comentar acerca del CH<sub>4</sub> que aumenta su contenido con la temperatura pero el ratio CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> disminuye con ella. Esta disminución puede deberse a que las reacciones principales productoras de CH<sub>4</sub> son de carácter exotérmico por lo que se ven perjudicadas con el aumento de la temperatura; el aumento, a su vez, encuentra su razón en la mayor liberación de CH<sub>4</sub> durante la etapa de desvolatilización.

Tabla 5.13. Resultados de la variación de la temperatura a la razón entre especies del gas producto.

T (°C)	H <sub>2</sub> /CO	CO/CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
750	0,19	1,12	0,79	0,21	13,47	1,79
750	0,20	1,21	0,84	0,24	12,84	1,98
850	0,19	1,19	0,93	0,23	13,29	1,52
850	0,32	1,19	0,65	0,38	13,60	2,05
950	0,52	1,14	0,46	0,59	14,26	1,81
1050	0,46	1,20	0,48	0,56	15,04	1,05
1050	0,76	1,25	0,34	0,95	13,82	1,57
1150	0,95	1,13	0,27	1,07	15,33	0,86

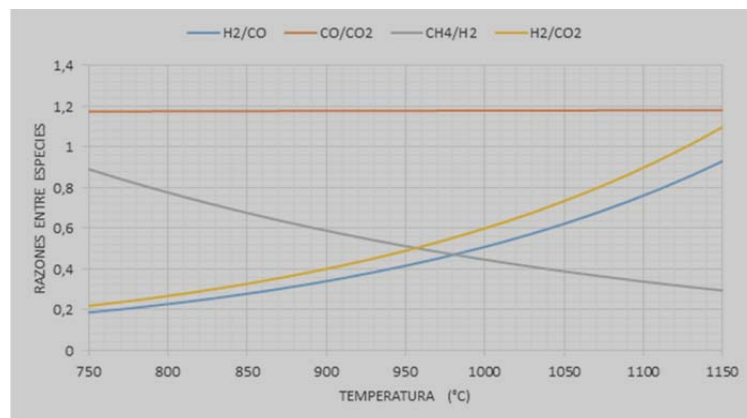


Figura 5.19. Razón entre especies Vs Temperatura.

Por otro lado, el aumento en el ratio  $H_2/CO$  se debe al mejoramiento de la reacción de WGS y las de reformado de vapor, las dos, reacciones endotérmicas por lo que se ven favorecidas con la temperatura; su crecimiento es prácticamente lineal desde 0.19 a 750°C hasta 0.95 en 1150°C[9], también indica que la reacción de WGS es la que mayor incide en la composición del gas producto a temperaturas por encima de 750°C. Con respecto al ratio  $CO/CO_2$ , puede verse que la temperatura no provoca una disminución (de 1.12 a 750°C a 1.13 a 1150°C) que encuentra su razón en el balance entre las reacciones productoras de CO (Boudouard y reformado de vapor) y las reacciones consumidoras de CO (WGS) que tienen mayor incidencia con la temperatura.

La tabla 5.14, obtenida del análisis realizado en Statgraphics Centurion, muestra los resultados ajustados a un modelo de regresión, puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las razones de las especies y el % vapor con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica el modelo ajustado entre 85,5525% a 88,0706% de la variabilidad, en cada una de las razones de las especies en el gas producto. El coeficiente de correlación indica una relación relativamente fuerte entre las variables. Así mismo, el error estándar del estimado indica que la desviación estándar de los residuos va de 0,182654 a 0,238787, por lo cual este valor puede usarse para construir límites de predicción para futuros ensayos de gasificación con adición de vapor, en la determinación del comportamiento de las reacciones en las propiedades del gas producto, caso contrario se nota en la razón  $CO/CO_2$ , que muestra una linealidad, la cual no permite generar límites de aproximación o predicción del comportamiento entre la gasificación y la combustión asociado a un incremento de la temperatura.

Tabla 5.14. Análisis estadístico de la variación de la temperatura a la razón de las especies en el gas producto.

Variable analizada	Modelo ajustado	Valor-P	Coeficiente de correlación	R-Cuadrada [%]	Error estándar
$H_2/CO$	$e^{-4,69604+0,0040209T}$	0,0006	0,938459	88,0706	0,237852
$CO/CO_2$	$1,16379 + 0,0000152903(T)$	0,9067	0,0498482	0,248484	0,0492399
$CH_4/H_2$	$e^{1,95899-0,00276542(T)}$	0,0010	-0,924946	85,5525	0,182654
$H_2/CO_2$	$e^{-4,54374+0,00403259(T)}$	0,0006	0,938345	88,0492	0,238787

### 5.1.3.Efectos en gases productos por el tiempo de residencia

La figura 5.20 y la tabla 5.15. Muestran los resultados obtenidos en cuanto a la composición volumétrica de gases combustibles. Para los cuales se nota que el volumen total de las especies combustibles pasó de 9,93% a 38,09, pero se debía generalmente a los cambios del dosado relativo de gasificación.

Tabla 5. 15. Resultados tiempo de residencia a la composición del gas.

tr (s)	N <sub>2</sub> (% vol)	H <sub>2</sub> (% vol)	CO (% vol)	CH <sub>4</sub> (% vol)	CO <sub>2</sub> (% vol)	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (% vol)	Total especies combustibles (% vol)
0,91	55,99	5,16	16,89	3,54	15,27	1,11	26,70
0,95	54,02	7,75	17,64	3,82	14,89	1,08	30,29
1,04	51,23	6,94	17,37	3,28	15,13	1,00	28,59
1,05	53,63	6,38	16,85	3,89	16,53	1,29	28,41
1,06	60,72	6,20	11,8	2,39	17,42	0,61	21,00
1,06	49,00	8,92	19,01	4,71	15,65	1,93	34,57
1,07	70,66	2,09	6,80	0,8	17,95	0,24	9,93
1,07	56,57	5,89	13,59	3,31	17,83	1,30	24,09
1,08	45,81	9,66	20,32	5,45	14,99	2,66	38,09
1,09	52,59	8,37	18,12	4,03	15,04	1,05	31,57
1,25	49,02	8,86	18,25	4,81	16,78	1,54	33,46

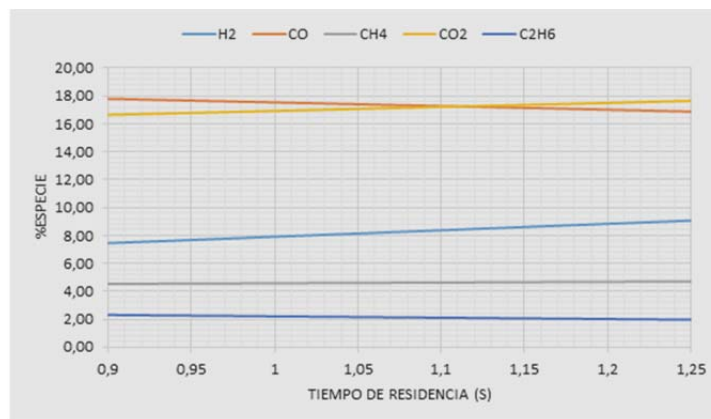


Figura 5. 20. % especies combustibles Vs Tiempo de residencia.

La tabla 5.16, obtenida del análisis realizado en Statgraphics Centurion, muestra los resultados ajustados a un modelo de regresión, puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es mayor que 0,05, no existe una relación estadísticamente significativa entre las especies combustibles y el tiempo de residencia con un nivel de confianza del 95,0%, el estadístico R-Cuadrada indica que los modelos ajustados tienen un muy bajo coeficiente de correlación en un rango del 1-9.3% lo cual puede ser debido a un comportamiento altamente aleatorio, no existe una clara tendencia de los datos. Así mismo, el error estándar del estimado indica que la desviación estándar de los residuos va de 3,00774 a 19,4903, indicando una alta variabilidad de los datos.

Tabla 5.16. Análisis estadístico al gas producto Vs Tiempo de Residencia.

Variable analizada	Modelo ajustado	Valor-P	Coefficiente de correlación	R-Cuadrada [%]	Error estándar
N <sub>2</sub>	51,9069 – 2,21397(tr)	0,9767	-0,0106573	0,0113578	19,4903
H <sub>2</sub>	3,2831 + 4,62758(tr)	0,7984	0,0929654	0,864256	4,65015
CO	20,1443 – 2,61181(tr)	0,9209	-0,0362285	0,13125	6,75967
CH <sub>4</sub>	4,10279 + 0,481725(tr)	0,9719	0,0128409	0,0164889	3,51954
CO <sub>2</sub>	14,0664 + 2,85828(tr)	0,8213	0,0822481	0,676475	3,24955
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	3,1716 – 0,962601(tr)	0,9344	-0,0300144	0,0900866	3,00774

La figura 5.21 y la tabla 5.17 muestran como varían el poder calorífico y la eficiencia de gas frío para los diferentes valores de tiempo de residencia. Como puede apreciarse, el CGE sufre un aumento sustancial con respecto a la variación del tiempo de residencia. La razón puede encontrarse en la contribución que hace el aumento de vapor.

La tabla 5.18, obtenida del análisis realizado en Statgraphics Centurion, muestra los resultados ajustados a un modelo de regresión, puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es mayor que 0,05, no existe una relación estadísticamente significativa entre las propiedades del gas producto y el Tiempo de residencia.

Tabla 5.17. Resultados de la variación del tiempo de residencia a las propiedades del gas producto.

tr (s)	PCI <sub>gas</sub> (MJ/Nm <sup>3</sup> )	PCI <sub>gas</sub> (MJ/kg)	GY (m <sup>3</sup> /kg daf)	GY (kg/kg daf)	CGE (%)
0,91	4,66	3,97	1,69	1,98	38,91
0,95	5,11	4,42	2,35	2,72	59,38
1,04	17,08	15,89	0,55	0,59	46,72
1,05	5,02	4,28	1,60	1,87	39,64
1,06	3,40	2,84	2,25	2,69	37,86
1,06	6,27	5,48	1,88	2,15	58,32
1,07	1,53	1,23	3,19	3,96	24,04
1,07	4,36	3,66	1,46	1,74	31,46
1,08	7,24	6,43	1,65	1,85	58,85
1,09	5,29	4,61	2,16	2,48	56,54
1,25	5,95	5,16	1,85	2,13	54,41

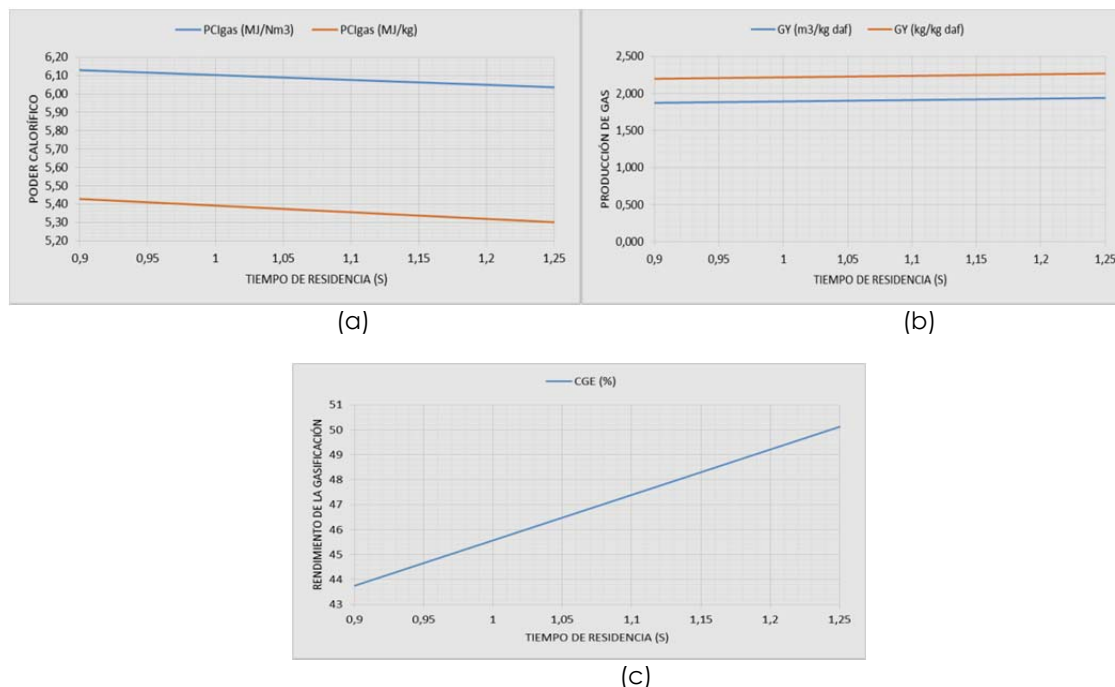


Figura 5.21. (a) PCI<sub>gas</sub> Vs Tiempo de residencia. (b) GY Vs Tiempo de residencia y (c) %CGE Vs Tiempo de residencia.

Tabla 5.18. Análisis estadístico a las propiedades del gas producto Vs Tiempo de residencia.

Variable analizada	Modelo ajustado	Valor-P	Coefficiente de correlación	R-Cuadrada [%]	Error estándar
PCIgas (MJ/Nm <sup>3</sup> )	6,36997 – 0,266835(tr)	0,9876	-0,00565593	0,00319895	4,4264
PCIgas (MJ/kg)	5,75404 – 0,362561(tr)	0,9823	-0,00808357	0,00653441	4,20807
GY (m <sup>3</sup> /kg daf)	1,70315 + 0,189236(tr)	0,9462	0,0245883	0,0604583	0,721876
GY (kg/kg daf)	2,01837 + 0,200315(tr)	0,9549	0,0206105	0,0424791	0,911701
CGE (%)	27,3597 + 18,2125(tr)	0,7298	0,125455	1,57389	13,5132

Entre tanto, la figura 5.22 y la tabla 5.19. -Muestran el comportamiento de las razones entre los gases productos con respecto al tiempo de residencia. El aumento del H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> es un indicativo del aumento de la importancia de las reacciones de reformado de vapor con la temperatura, ya que es constante su tiempo de residencia. Resulta interesante comentar acerca del CH<sub>4</sub> que se mantiene constante su contenido con el tiempo de residencia pero el ratio CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> disminuye con ella. Esta disminución puede deberse a que las reacciones principales productoras de CH<sub>4</sub> son de carácter exotérmico por lo que se ven perjudicadas con el aumento de la temperatura, ya que se puede generar mayor combustión y disminuir la gasificación.

En la tabla 5.20, se observa el análisis de varianza efectuado para cada una de las propiedades del gas producto en función de la variación del tiempo de residencia notando una muy baja correlación entre estas variables y el factor estudiado, analizando en este caso, que razones de las especies no guardan una tendencia con respecto al tiempo de residencia, puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es mayor que 0,05, no existe una relación estadísticamente significativa.

Tabla 5.19. Resultados de la variación del tiempo de residencia a la razón entre especies del gas producto.

tr (s)	H <sub>2</sub> /CO	CO/CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>
0,91	0,31	1,11	0,69	0,34
0,95	0,44	1,18	0,49	0,52
1,04	0,60	1,25	0,70	0,75
1,05	0,38	1,02	0,61	0,39
1,06	0,53	0,68	0,38	0,36
1,06	0,47	1,22	0,53	0,57
1,07	0,31	0,38	0,38	0,12
1,07	0,43	0,76	0,56	0,33
1,08	0,48	1,36	0,56	0,64
1,09	0,46	1,20	0,48	0,56
1,25	0,49	1,09	0,54	0,53



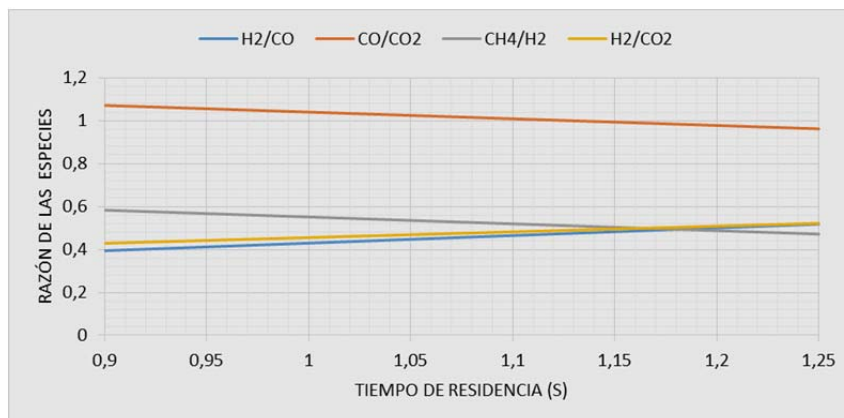


Figura 5.22. Razón entre especies Vs tiempo de residencia

Debido a que el estadístico R-Cuadrada indica el modelo ajustado entre 1.6119% y 12.0506% de la variabilidad, en cada una de las razones de las especies en el gas producto. El coeficiente de correlación indica una relación muy baja entre las variables. Así mismo, el error estándar del estimado indica que la desviación estándar de los residuos va de 0,0897795 a 0,328615.

Tabla 5.20. Análisis estadístico de la variación de la temperatura a la razón de las especies en el gas producto.

Variable analizada	Modelo ajustado	Valor-P	Coeficiente de correlación	R-Cuadrada [%]	Error estándar
H <sub>2</sub> /CO	0,0756124 + 0,354197(tr)	0,3257	0,347139	12,0506	0,0897795
CO/CO <sub>2</sub>	1,3522 – 0,311727(tr)	0,8076	-0,0886528	0,785933	0,328615
CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub>	0,870798 – 0,319214(tr)	0,4598	-0,264746	7,00904	0,109092
H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>	0,189049 + 0,266603(tr)	0,7261	0,127269	1,61974	0,194946

### 5.1.4.Efectos en gases productos por el dosado relativo de gasificación

La tabla 5.21 y la figura 5.23. Recogen los resultados en cuanto al porcentaje en volumen de los gases productos. Se puede ver que en general, el efecto del dosado relativo de gasificación tiene un efecto positivo en la generación de especies combustibles, en concordancia con las conclusiones de [1]. El porcentaje en volumen crece desde un 9,93% cuando se gasifica con solo aire hasta un 73,99 % cuando el agente gasificante es netamente vapor. El CO presenta un crecimiento prácticamente lineal desde 6,8% a 31,37 % pasando de aire puro a vapor puro. En cambio, el H<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>, sufren un crecimiento no lineal, el primero, de 2,09% a 18,94% y, el segundo, de 0,8% a 13,28% cuando se tiene 100% de contenido de vapor en el agente gasificante, lo que concuerda con los resultados obtenidos por [2]. El incremento de CH<sub>4</sub> y otros hidrocarburos puede deberse a la reducción de la biomasa en la etapa de desvolatilización, la cual no es compensada por el consumo de CH<sub>4</sub> en las reacciones de reformado. Por otra parte, la producción de CH<sub>4</sub> vía hidrogasificación o metanación (ambas reacciones exotérmicas) son favorecidas por las menores temperaturas dentro del tanque causadas a su vez, por el menor contenido de aire dentro del agente gasificante.

Tabla 5.21. Resultados efecto del Frg a la composición del gas producto.

Frg	N <sub>2</sub> (% vol)	H <sub>2</sub> (% vol)	CO (% vol)	CH <sub>4</sub> (% vol)	CO <sub>2</sub> (% vol)	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (% vol)	Total especies combustibles (% vol)
2.09	70.66	2.09	6.80	0.80	17.95	0.24	9,93
3.92	60.72	6.20	11.80	2.39	17.42	0.99	21,38
4.06	52.59	8.37	18.12	4.03	15.04	1.03	31,55
4.36	54.02	7.75	17.64	3.82	14.89	1.14	30,35
4.63	49.02	8.86	18.25	4.81	16.78	1.22	33,14
4.92	53.63	6.38	16.85	3.89	16.53	1.35	28,47
5.50	55.99	5.16	16.89	3.54	15.27	1.54	27,13
5.58	56.57	5.89	13.59	3.31	17.83	1.60	24,39
5.95	49.00	8.92	19.01	4.71	15.65	1.75	34,39
7.74	45.81	9.66	20.32	5.45	14.99	2.43	37,86
Infinito	1.23	18.94	31.37	13.28	25.13	10.4	73,99

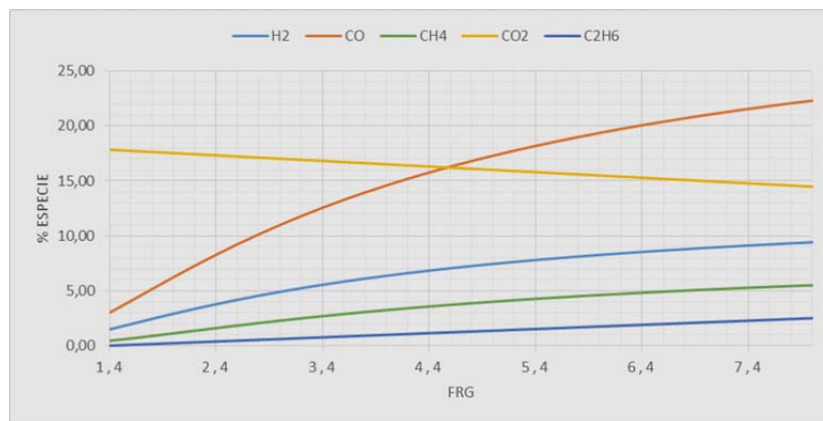


Figura 5. 23. % de especies Vs Frg.

La tabla 5.22, obtenida del análisis realizado en Statgraphics Centurion, muestra los resultados ajustados a un modelo de regresión, puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las especies combustibles y el % vapor con un nivel de confianza del 95,0%. Del cual se realizó el estudio del modelo de regresión en el efecto a la adición de vapor y dosado relativo empleando las ecuaciones 5.1 y 5.2 para el Hidrogeno y Monóxido respectivamente.

Tabla 5.22. Análisis estadístico al gas producto Vs Frg.

Variable analizada	Modelo ajustado	Valor-P	Coefficiente de correlación	R-Cuadrada [%]	Error estándar
N <sub>2</sub>	$76,9263 - 14,8413[\ln(Frg)]$	0,0000	-0,870158	75,7175	3,44126
H <sub>2</sub>	$e^{[2,63291 - \frac{3,12488}{Frg}]}$	0,0000	-0,809709	65,5629	0,301771
CO	$e^{[3,52927 - \frac{3,39654}{Frg}]}$	0,0000	-0,935779	87,5682	0,170526
CH <sub>4</sub>	$e^{[2,23353 - \frac{4,22128}{Frg}]}$	0,0000	-0,931537	86,7761	0,219576
CO <sub>2</sub>	$18,5448 - 0,50907(Frg)$	0,0082	-0,560568	31,4236	1,16523
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	$-0,521202 + 0,37863(Frg)$	0,0000	0,908254	82,4926	0,270268



El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo ajustado es superior a 65,5629% de la variabilidad en cada una de las especies combustibles. El coeficiente de correlación es mayor a - 0,935779, indicando una relación relativamente fuerte entre las variables. Así mismo, el error estándar del estimado indica que la desviación estándar de los residuos va de 0,170526 a 3,44126, por lo cual este valor puede usarse para construir límites de predicción para futuros ensayos de gasificación con adición de vapor y le dosado relativo.

Tabla 5.23. Resultados de la variación del Frg a las propiedades del gas producto.

Frg	PCl <sub>gas</sub> (MJ/Nm <sup>3</sup> )	PCl <sub>gas</sub> (MJ/kg)	GY (m <sup>3</sup> /kg daf)	GY (kg/kg daf)	CGE (%)
2.09	1.53	1.23	3.19	3.96	24.04
3.92	3.40	2.84	2.25	2.69	37.86
4.06	5.29	4.61	2.16	2.48	56.54
4.36	5.11	4.42	2.35	2.72	59.38
4.63	5.95	5.16	1.85	2.13	54.41
4.92	5.02	4.28	1.60	1.87	39.64
5.50	4.66	3.97	1.69	1.98	38.91
5.58	4.36	3.66	1.46	1.74	31.46
5.95	6.27	5.48	1.88	2.15	58.32
7.74	7.24	6.43	1.65	1.85	58.85
Infinito	17.08	15.89	0.55	0.59	46.72

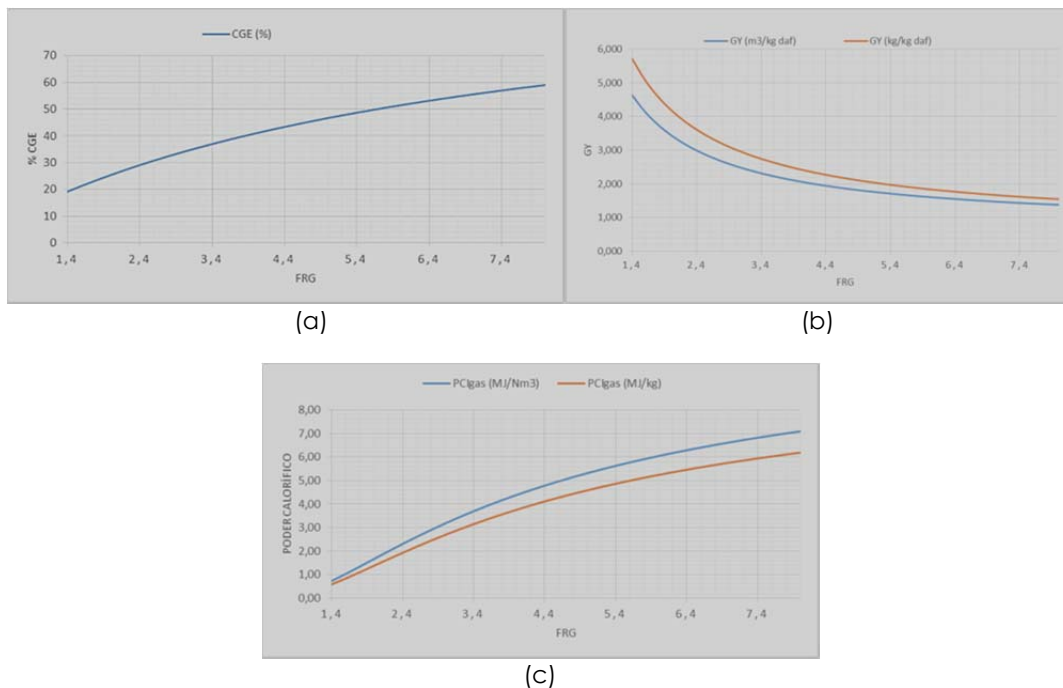


Figura 5.24. (a) % CGE Vs Frg. (b) GY Vs Frg. (c) PCI Vs Frg.

Como era de esperarse en la Figura 5.24 y la tabla 5.23 se nota, un incremento en el porcentaje de especies combustibles generadas deriva en un crecimiento del poder calorífico del gas producto (1,23 MJ/kg a 15,89 MJ/kg con agente gasificante de vapor). La tendencia opuesta ocurre con el GY, la cual decrece de 3,96 kg daf/kg

hasta 0,59 kg daf/daf; esto puede deberse a varias razones como menor conversión de carbón y/o el exceso de agua en el proceso debido al exceso de vapor que no toma parte de las reacciones de gasificación. Estos resultados concuerdan con los publicados por [2] que afirma que ante el exceso de vapor, el Gas Yield y la conversión de carbón disminuían[3][4].

La tendencia opuesta entre GY y el poder calorífico puede deberse a la existencia de un máximo en la eficiencia en frío del gas producto, que se observa aun cuando el dosado relativo se encuentre a entre 3.9 y 6.0, de acuerdo a la figura 5.21. De hecho, se observa que en dicho intervalo existe un equilibrio entre el poder calorífico y GY, por lo cual puede afirmarse que es un intervalo óptimo para la gasificación con mezcla entre vapor y aire.

Tabla 5.24. Análisis estadístico a las propiedades del gas producto Vs Frg.

Variable analizada	Modelo ajustado	Valor-P	Coefficiente de correlación	R-Cuadrada [%]	Error estándar
PCIgas (MJ/Nm <sup>3</sup> )	$e^{\left[2,44025 - \frac{3,85018}{Frg}\right]}$	0,0000	-0,940819	88,5141	0,184807
PCIgas (MJ/kg)	$e^{\left[2,32172 - \frac{3,99493}{Frg}\right]}$	0,0000	-0,933848	87,2072	0,20388
GY (m <sup>3</sup> /kg daf)	$0,690189 + \frac{5,52256}{Frg}$	0,0000	0,948446	89,955	0,245902
GY (kg/kg daf)	$0,664647 + \frac{7,06822}{Frg}$	0,0000	0,953157	90,8509	0,298878
CGE (%)	$\frac{1}{0,00949484 + \frac{0,0597531}{Frg}}$	0,0000	0,799681	63,949	0,00597808

La tabla 5.24, obtenida del análisis realizado en Statgraphics Centurion, muestra los resultados ajustados a un modelo de regresión, puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las propiedades del gas producto y el % vapor con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo ajustado entre 63,949% a 90,8509% de la variabilidad en cada una de las propiedades del gas producto. El coeficiente de correlación es mayor a 0,953157, indicando una relación relativamente fuerte entre las variables. Así mismo, el error estándar del estimado indica que la desviación estándar de los residuos va de 0,00597808 a 0,298878, por lo cual este valor puede usarse para construir límites de predicción para futuros ensayos de gasificación con adición de vapor, en la determinación de las propiedades del gas producto, es por ello que las ecuaciones del modelo de regresión se aproximan a las 5.3, 5.4 y 5.5.

La figura 5.25 y la tabla 5.25 muestran información acerca del comportamiento de las razones entre los gases productos [mol/mol]. Dicha gráfica provee información acerca de la manera en que se desarrollan las reacciones de gasificación. En primer lugar, se observa que los ratios H<sub>2</sub>/CO y H<sub>s</sub>/CO<sub>s</sub> crecen de forma no-lineal según crezca la cantidad de vapor, lo que indica que la adición de vapor promueve las reacciones de reformado de cenizas y alquitranes, además de la water-gas shift debido a una mayor cantidad de vapor disponible para reaccionar. En particular, el ratio H<sub>s</sub>/CO pasó de 0,31 (2.09 Frg) a 0,6 (Infinito Frg); en cambio, el ratio H<sub>s</sub>/CO<sub>s</sub> aumentó de 0,12 a 0,75%.

Tabla 5.25. Resultados efecto del Frg a la razón entre especies del gas producto.

Frg	H <sub>2</sub> /CO	CO/CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>
2.09	0.31	0.38	0.38	0.12
3.92	0.53	0.68	0.38	0.36
4.06	0.46	1.20	0.48	0.56
4.36	0.44	1.18	0.49	0.52
4.63	0.49	1.09	0.54	0.53
4.92	0.38	1.02	0.61	0.39
5.50	0.31	1.11	0.69	0.34
5.58	0.43	0.76	0.56	0.33
5.95	0.47	1.22	0.53	0.57
7.74	0.48	1.36	0.56	0.64
Infinito	0.60	1.25	0.70	0.75

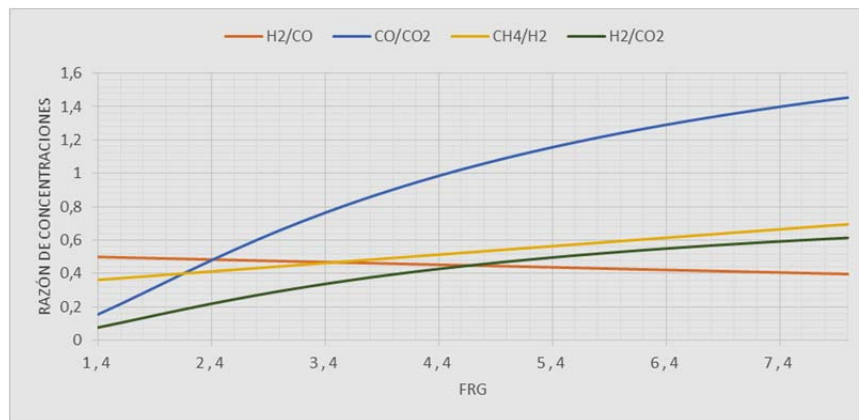


Figura 5.25. Razón entre especies Vs Frg.

Por otra parte, el ratio CO/CO<sub>2</sub> crece con el cambio del dosado relativo de gasificación, pero cuando se estabiliza por encima de 1.4 aun cuando se gasifica a con dosados relativo de gasificación hasta 6.0 o 56% de contenido de vapor. Esto puede deberse al incremento de las reacciones WGS que equilibran la reacción de Bouduard que es la principal generadora de CO. El ratio CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> presenta un leve incremento en el rango de variación del contenido de vapor, el cual se ve acelerado a partir de 56% de vapor. Este comportamiento tiene razón en el favorecimiento de la reacción de reformado de CH<sub>4</sub> y en el empeoramiento de la combustión producida en la etapa de gasificación (Debido a la ausencia de aire disponible), lo que afecta negativamente a la temperatura de reacción dentro del gasificador y además, favorece la producción de CH<sub>4</sub> vía metanación o gasificación.

La tabla 5.26, obtenida del análisis realizado en Statgraphics Centurion, muestra los resultados ajustados a un modelo de regresión, puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las razones de las especies y el dosado relativo de gasificación con un nivel de confianza del 95,0%, por lo cual se debe remitir a la adición de vapor para estimar un modelo de regresión asociado a las ecuaciones 5.6, 5.7, 5.8 y 5.9.

Tabla 5.26. Análisis estadístico del Frg a la razón de las especies en el gas producto.

Variable analizada	Modelo ajustado	Valor-P	Coefficiente de correlación	R-Cuadrada [%]	Error estándar
H <sub>2</sub> /CO	0,521227 - 0,0155434(Frg)	0,3869	-0,199109	3,96444	0,118536
CO/CO <sub>2</sub>	$e^{[0,850043 - \frac{3,80452}{Frg}]}$	0,0000	-0,919358	84,522	0,216936
CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub>	0,291376 + 0,0504916(Frg)	0,0028	0,618475	38,2511	0,0994005
H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>	$e^{[-0,0463162 - \frac{3,53286}{Frg}]}$	0,0000	-0,807596	65,2212	0,343755

La figura 5.26 y la tabla 5.27 muestran el porcentaje de distribución de los productos de la gasificación [% peso total]: Gas producto, cenizas y condensados (agua y alquitranes, principalmente). Se observa un incremento en el porcentaje de condensados con el aumento del dosado relativo de gasificación, de 4,38% a 62,55% (100% de vapor), que puede deberse a la cantidad de agua en exceso que no hace parte de las reacciones de gasificación. En cambio, la fracción de gases productos decrece desde un 93,08% para gasificación con aire hasta un 16,11% cuando se gasifica solo con vapor. El Char, presenta un ligero crecimiento, de 4,38% a 12,68%, que encuentra explicación en la menor conversión de carbón debido al déficit de aire y O<sub>2</sub> al aumentar el dosado relativo de gasificación, específicamente, que se aumenta con la adición de vapor.

Tabla 5.27. Resultados efecto de la adición de vapor a la formación de productos.

Frg	%gas	%char	%condensados
2.09	93.08	4.38	4.38
3.92	77.46	9.35	12.30
4.06	68.51	10.54	21.93
4.36	74.49	9.46	16.66
4.63	51.40	9.25	51.19
4.92	53.75	8.90	25.22
5.50	65.50	5.50	30.43
5.58	62.65	11.07	13.34
5.95	55.57	10.25	32.62
7.74	51.13	8.53	37.97
Infinito	16.11	12.68	62.55

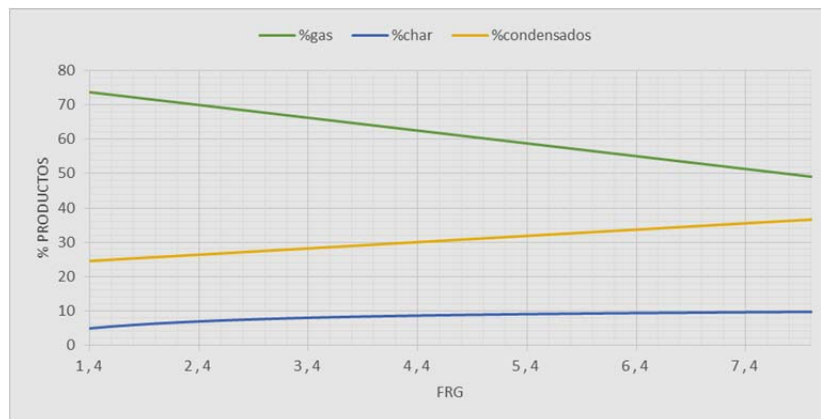


Figura 5.26. % Productos Vs Frg.

Teniendo en cuenta todos los anteriores resultados mostrados, puede afirmarse que la gasificación de biomasa con aire y vapor, presenta un rango óptimo cuando el contenido de vapor oscila entre 40% y 70%, aun cuando el dosado relativo de gasificación no este fijo. En estos valores, se tiene que las reacciones de combustión asociadas al aire previenen el decaimiento de la temperatura de reacción en el gasificador, a la vez que favorecen la producción de CO y CO<sub>2</sub>. El aire extiende la etapa de desvolatilización y favorece a las reacciones endotérmicas de gasificación. Por su parte, el vapor favorece las reacciones de WGS y reformados de char y alquitranes como apuntan varios autores [4][5][6][7][8].

Adicionalmente como la formación del char al aumentar el dosado relativo de gasificación es levemente constante, se puede notar en la figura 5.27 sus características tales como el análisis inmediato a 3.9 del Frg, el carbono fijo finaliza su estabilización, mostrando a su vez que el poder calorífico como lo muestra la figura 5.28 cae súbitamente en el gas producto, por ende la humedad se reduce, mostrando estado posiblemente aumento de Temperatura ver figura 5.29.

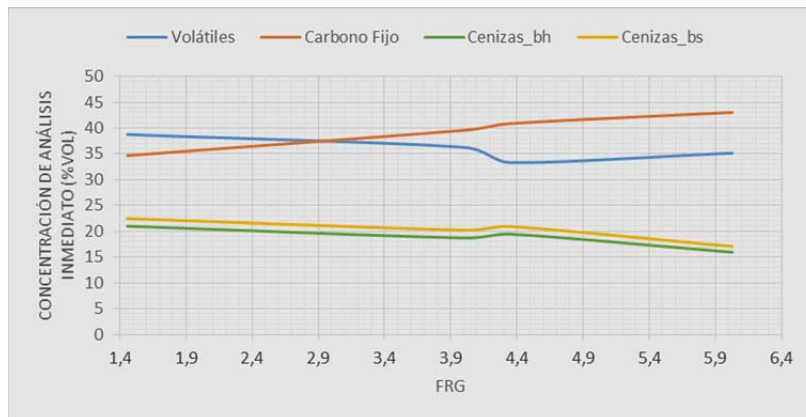


Figura 5. 27. Análisis inmediato Vs Frg.

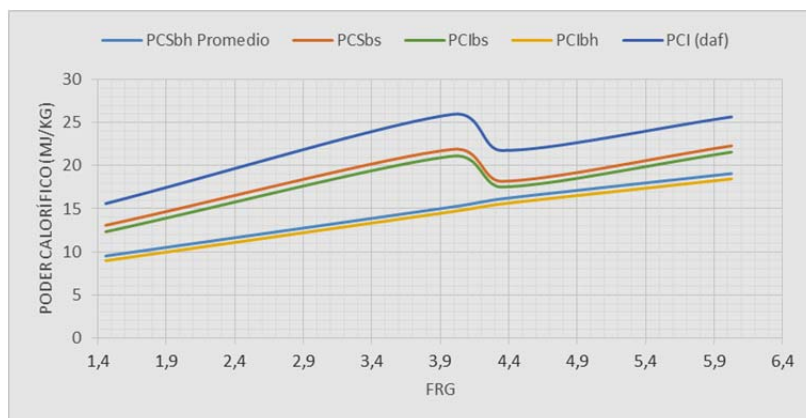


Figura 5. 28. Poder calorífico Vs Frg

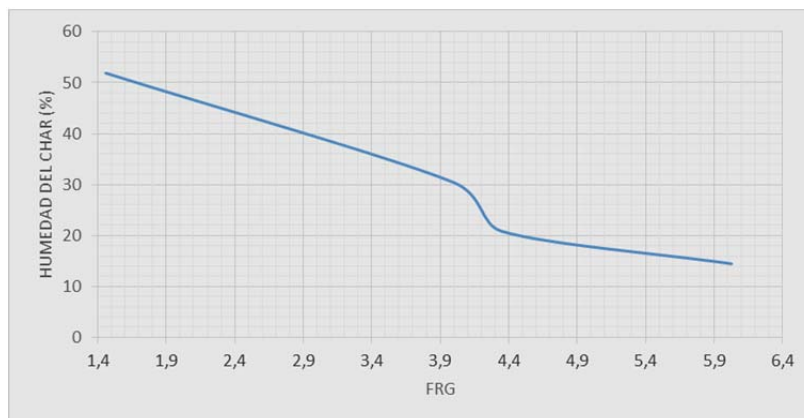


Figura 5. 29. Húmedad Vs Frg.

La tabla 5.28, obtenida del análisis realizado en Statgraphics Centurión, muestra los resultados ajustados a un modelo de regresión, puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es mayor que 0,05, por lo cual no existe una relación estadísticamente significativa entre la formación de productos, cuando se modifica el dosado relativo de gasificación.

Tabla 5.289. Análisis estadístico del Frg a la formación de productos.

Variable analizada	Modelo ajustado	Valor-P	Coefficiente de correlación	R-Cuadrada [%]	Error estándar
%gas	$78,9424 - 3,72884(Frg)$	0,0659	-0,408597	16,6952	12,906
%char	$e^{[2,41694 - \frac{1,16122}{Frg}]}$	0,0290	-0,47645	22,7005	0,285526
%condensados	$21,9858 + 1,82657(Frg)$	0,4417	0,17742	3,14779	15,6988

### 5.1.5.Efectos en gases productos por el ratio S/B

La tabla 5.29 y la figura 5.30. Recogen los resultados en cuanto al porcentaje en volumen de los gases productos. Se puede ver que en general, que los Ratios Vapor / Biomasa (S/B), tiene un efecto positivo en la generación de especies combustibles. El porcentaje en volumen crece desde un 19,04% hasta un 71,78 % cuando el agente gasificante es netamente vapor. El CO presenta un crecimiento lineal desde 11,83% a 30,057 %. En cambio, el H2 y CH4, sufren un crecimiento no lineal, el primero, de 4,95% a 19,38% y, el segundo, de 2,16% a 13,09%, este incremento de CH4 y otros hidrocarburos puede deberse a la reducción de la biomasa en la etapa de desvolatilización, la cual no es compensada por el consumo de CH4 en las reacciones de reformado. Por otra parte, la producción de CH4 vía Hidrogasificación o metanación (ambas reacciones exotérmicas) son favorecidas por las menores temperaturas dentro del tanque causadas a su vez, por el menor contenido de aire dentro del agente gasificante.



Tabla 5. 29 Resultados efecto de Ratio S/B a la composición del gas producto

Ratio S/B	N <sub>2</sub> (% vol)	H <sub>2</sub> (% vol)	CO (% vol)	CH <sub>4</sub> (% vol)	CO <sub>2</sub> (% vol)	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (% vol)	Total especies combustibles (% vol)
0,43	63,11	4,95	11,83	2,16	15,43	0,1	19,04
0,54	62,22	5,16	12,69	2,32	15,54	0,24	20,41
0,62	61,12	5,42	13,56	2,52	15,68	0,4	21,91
0,92	56,66	6,49	16,16	3,33	16,22	1,08	27,06
0,92	54,77	6,94	17,03	3,67	16,45	1,36	29
1,05	52,69	7,44	17,9	4,05	16,71	1,68	31,06
1,39	47,93	8,58	19,63	4,91	17,29	2,4	35,52
1,49	45,25	9,22	20,5	5,39	17,62	2,81	37,92
1,49	42,37	9,9	21,37	5,91	17,98	3,24	40,43
2,45	2,67	19,38	30,05	13,09	22,84	9,25	71,78

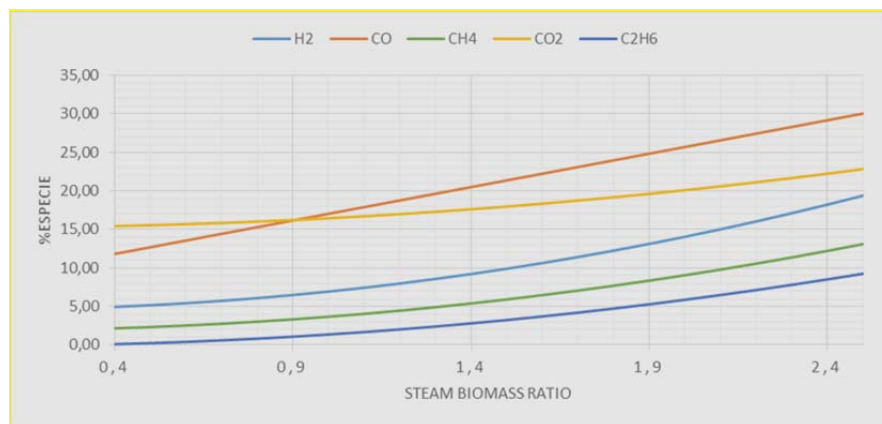


Figura 5.30. % vol. gases productos Vs Ratio S/B

La tabla 5.30, obtenida del análisis realizado en Statgraphics Centurion, muestra los resultados ajustados a un modelo de regresión, puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las especies combustibles y el % vapor con un nivel de confianza del 95,0%.

Tabla 5.30. Análisis estadístico al gas producto Vs % de vapor.

Variable analizada	Modelo ajustado	Valor-P	Coefficiente de correlación	R-Cuadrada [%]	Error estándar
N <sub>2</sub>	$64,6976 - 9,92406 * (S/B)^2$	0,0000	0,968965	93,8892	4,81828
H <sub>2</sub>	$4,5689 + 2,3705 * (S/B)^2$	0,0000	0,965941	93,3043	1,20851
CO	$8,35489 + 8,67608 * S/B$	0,0000	0,955029	91,2081	2,00563
CH <sub>4</sub>	$1,87531 + 1,79505 * (S/B)^2$	0,0000	0,970549	94,1964	0,847948
CO <sub>2</sub>	$15,2386 + 1,21636 * (S/B)^2$	0,0214	0,709949	50,4027	2,29629
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	$-0,139935 + 1,50284 * (S/B)^2$	0,0000	0,950476	90,3404	0,935222

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo ajustado es superior a 90,3404 % de la variabilidad en cada una de las especies combustibles. El coeficiente de correlación es mayor a 0,950476, indicando una relación relativamente fuerte entre las variables. Así mismo, el error estándar del estimado indica que la desviación estándar de los residuos va de 0,847948 a 4,81828, por lo cual este valor puede usarse para construir

límites de predicción para futuros ensayos de gasificación con relaciones preestablecidas de Vapor y Biomasa.

Es por ello que estudiar la generación de Hidrogeno ( $H_2$ ) y Monóxido de Carbono ( $CO$ ), desde una evaluación del ratio S/B y el dosado relativo de gasificación, permite establecer un modelo de regresión como se nota en las ecuaciones 5.10 y 5.11 con el estadístico R-Cuadrada superior a 95,7585 % y 90,2314 %, así como un error estándar del estimado que valora la desviación de los residuos de 0,806637 y 1,70402 respectivamente, generando un parámetro de predicción, como se nota en las figuras 5.31 y 5.32, asociado con la relación  $H_2/CO$ , como parámetro para la obtención de gas de síntesis.

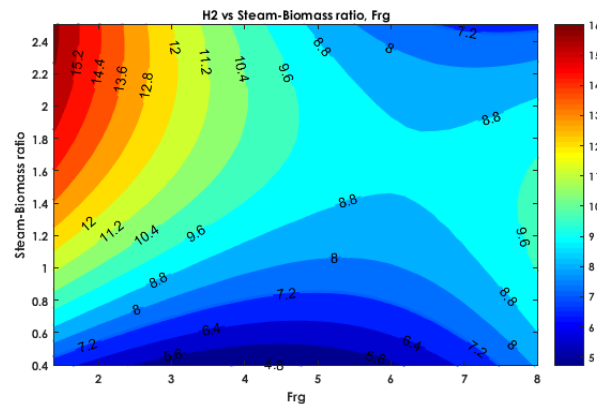


Figura 5.31. Contorno  $H_2$  Vs Ratio S/B y Frig.

**Modelo de regresión de la razón  $H_2$  con el Ratio S/B y Frig**

$$H_2 = 4,8924 - 2,06963(S/B)^2 + 0,241343(Frig^2) - 0,75338(Frig)(S/B) + 11,5305(S/B) - 1,76786(Frig) \quad (Eq. 5.10)$$

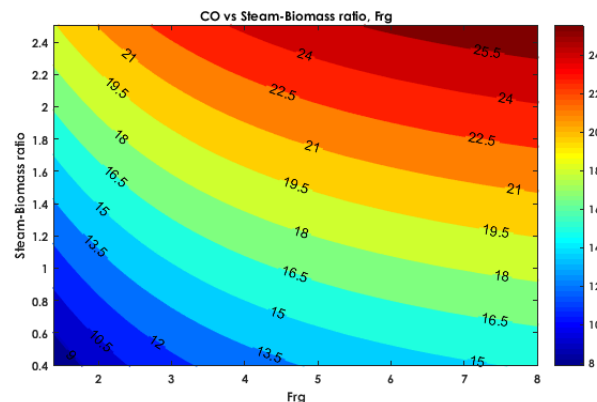


Figura 5.32. Contorno  $CO$  Vs Ratio S/B y Frig.

**Modelo de regresión de la razón  $CO$  con el Ratio S/B y Frig**

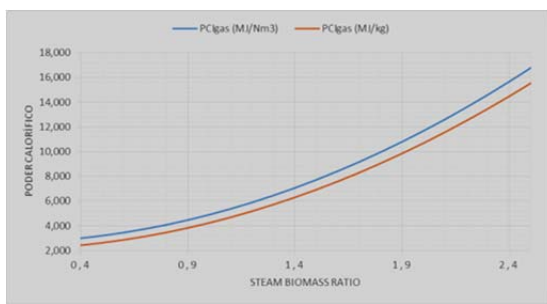
$$CO = e^{\left(2,5796 - \frac{2,14972}{Frig}\right)} + 2,89321 + 5,43748(S/B) \quad (Eq. 5.11)$$



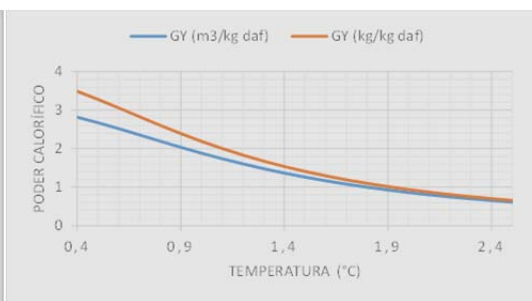
La figura 5.33 y tabla 5.31 presentan las propiedades del gas producto en relación al contenido de vapor.

Tabla 5.31. Resultados efecto Ratio S/B a las propiedades del gas producto.

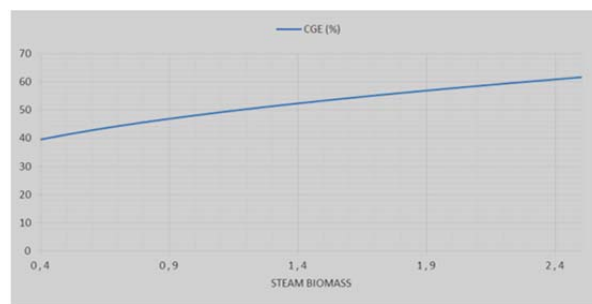
Ratio S/B	PCl <sub>gas</sub> (MJ/Nm <sup>3</sup> )	PCl <sub>gas</sub> (MJ/kg)	GY (m <sup>3</sup> /kg daf)	GY (kg/kg daf)	CGE (%)
0,00	1,53	1,23	3,19	3,96	24,04
0,43	4,36	3,66	1,46	1,74	31,46
0,54	3,40	2,84	2,25	2,69	37,86
0,62	4,66	3,97	1,69	1,98	38,91
0,92	5,11	4,42	2,35	2,72	59,38
0,92	5,02	4,28	1,60	1,87	39,64
1,05	5,29	4,61	2,16	2,48	56,54
1,39	5,95	5,16	1,85	2,13	54,41
1,49	6,27	5,48	1,88	2,15	58,32
1,49	7,24	6,43	1,65	1,85	58,85
2,45	17,08	15,89	0,55	0,59	46,72



(a)



(b)



(c)

Figura 5.33. (a) % CGE Vs Ratio S/B. (b) GY Vs Ratio S/B. (c) PCI Vs Ratio S/B.

Como era de esperarse, un incremento en el porcentaje de especies combustibles generadas deriva en un crecimiento del poder calorífico del gas producto (1,23 MJ/kg a 15,89 MJ/kg con agente gasificante de vapor dentro de los Ratio S/B evaluados). La tendencia opuesta ocurre con el GY, la cual decrece de 3,96 kg daf/kg hasta 0,59 kg daf/kg; esto puede deberse a varias razones como menor conversión de carbón y/o el exceso de agua en el proceso debido al exceso de vapor que no toma parte de las reacciones de gasificación. Estos resultados concuerdan con los publicados por [2] que

afirma que ante el exceso de vapor, el Gas Yield y la conversión de carbón disminuían[3][4].

La tendencia opuesta entre GY y el poder calorífico puede deberse a la existencia de un máximo en la eficiencia en frío del gas producto, que se observa cuando el agente gasificante cuando tiene a igualarse a 1,0 el Ratio S/B, lo que indica que el porcentaje de vapor esta entre 40% al 70%, de acuerdo a la figura 5.33, por lo cual puede afirmarse que es un intervalo óptimo para la gasificación con mezcla entre vapor y aire.

La tabla 5.32, obtenida del análisis realizado en Statgraphics Centurion, muestra los resultados ajustados a un modelo de regresión, puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las propiedades del gas producto y el % vapor con un nivel de confianza del 95,0%.

Tabla 5.32. Análisis estadístico a las propiedades del gas producto Vs Ratio S/B.

Variable analizada	Modelo ajustado	Valor-P	Coefficiente de correlación	R-Cuadrada [%]	Error estándar
PCIgas (MJ/Nm <sup>3</sup> )	$2,63929 + 2,2608 * (S/B)^2$	0,0000	0,97202	94,4822	1,03978
PCIgas (MJ/kg)	$2,09036 + 2,1504 * (S/B)^2$	0,0000	0,972506	94,5768	0,979997
GY (m <sup>3</sup> /kg daf)	$\frac{1}{0,321938 + 0,20906 * (S/B)^2}$	0,0006	0,886774	78,6369	0,207374
GY (kg/kg daf)	$\frac{1}{0,254512 + 0,202219 * (S/B)^2}$	0,0004	0,898047	80,6488	0,188513
CGE (%)	$24,886 + 23,2637 * \sqrt{S/B}$	0,0084	0,775386	60,1224	8,60135

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo ajustado entre 60,1224% a 94,5768% de la variabilidad en cada una de las propiedades del gas producto. El coeficiente de correlación es mayor a 0,775386, indicando una relación relativamente fuerte entre las variables. Así mismo, el error estándar del estimado indica que la desviación estándar de los residuos va de 0,188513 a 8,60135, por lo cual este valor puede usarse para construir límites de predicción para futuros ensayos de gasificación con Ratios S/B específicos, en la determinación de las propiedades del gas producto.

En efecto se puede estudiar el poder calorífico inferior del gas (PCI), la producción de gas (GY) y el rendimiento de la gasificación (CGE), desde una evaluación de los Ratio S/B con el dosado relativo de gasificación, y este permite establecer un modelo de regresión como se nota en las ecuaciones 5.12, 5.13 y 5.14 con el estadístico R-Cuadrada superior a 95,6141%, 92,297% y 95,4101%, así como un error estándar del estimado que valora la desviación de los residuos de 0,405703, 0,238105 y 4,76529 respectivamente, generando un parámetro de predicción, como se nota en las figuras 5.34, 5.35 y 5.36, asociado con las propiedades energéticas del gas.

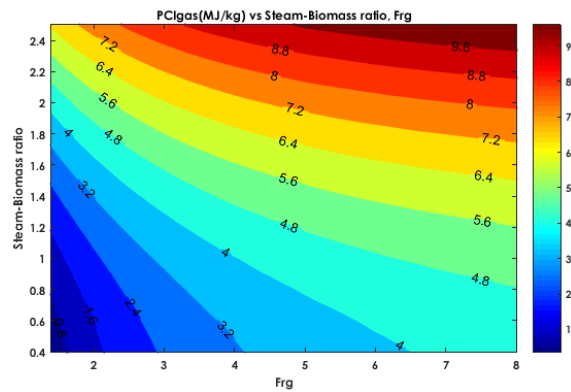


Figura 5.34. Contorno PCIgas con él Ratio S/B y Frg  
Modelo de regresión del PCIgas con el Ratio S/B y Frg

$$PCI_{gas} = -2,37194 + 1,0019 * (S/B)^2 + e^{2,06589 - \frac{1,56705}{Frg}} \quad (\text{Eq. 5.12})$$

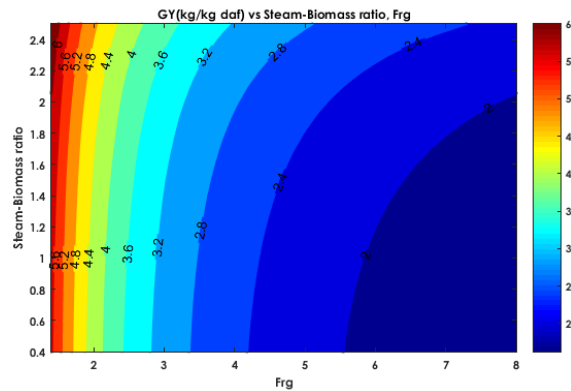


Figura 5.35 GY con él Ratio S/B y Frg  
Modelo de regresión de GY con el Ratio S/B y Frg

$$GY = \frac{1}{1,04237 - 0,0705756 * \left(\frac{S}{B}\right)^2} - 0,194791 + \frac{6,78854}{Frg} \quad (\text{Eq. 5.13})$$

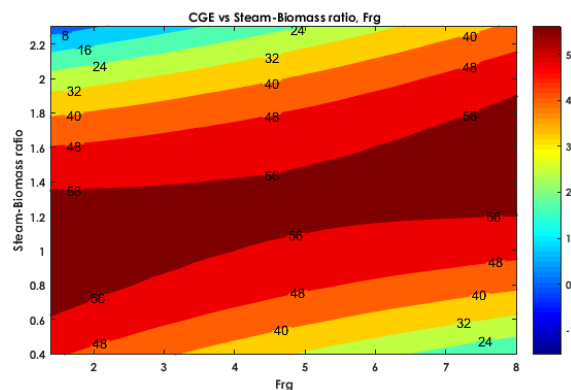


Figura 5.36 CGE con él Ratio S/B y Frg  
Modelo de regresión de CGE con el Ratio S/B y Frg

$$CGE = -7,51082(Frg) + 57,1624(S/B) + 5,64054(Frg)(S/B) + 38,7372 + 0,0304732(Frg^2) - 32,9686(S/B)^2 \quad (\text{Eq. 5.14})$$

La figura 5.37 y la tabla 5.33 muestran información acerca del comportamiento de las razones entre los gases productos [mol/mol]. Dicha gráfica provee información acerca de la manera en que se desarrollan las reacciones de gasificación. En primer lugar, se observa que los ratios  $H_2/CO$  y  $H_2/CO_2$  crecen de forma no-lineal según crezca Ratio S/B, lo que indica que la relación promueve las reacciones de reformado de cenizas y alquitranes, además de la water-gas shift debido a una mayor cantidad de vapor disponible para reaccionar. En particular, el ratio  $H_2/CO$  pasó de 0,31 (Ratio S/B de 0,0) a 0,6 (Ratio S/B de 2,45); en cambio, el ratio  $H_2/CO_2$  aumentó de 0,12 a 0,75%.

Tabla 5.33. Resultados efecto del Ratio S/B a la razón entre especies del gas producto.

Ratio S/B	$H_2/CO$	$CO/CO_2$	$CH_4/H_2$	$H_2/CO_2$
0,00	0,31	0,38	0,38	0,12
0,43	0,43	0,76	0,56	0,33
0,54	0,53	0,68	0,38	0,36
0,62	0,31	1,11	0,69	0,34
0,92	0,44	1,18	0,49	0,52
0,92	0,38	1,02	0,61	0,39
1,05	0,46	1,20	0,48	0,56
1,39	0,49	1,09	0,54	0,53
1,49	0,47	1,22	0,53	0,57
1,49	0,48	1,36	0,56	0,64
2,45	0,60	1,25	0,70	0,75

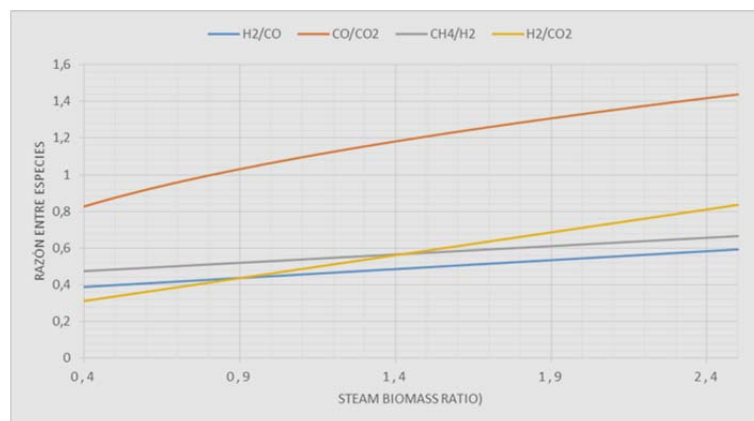


Figura 5.37. Razón de concentración de especies Vs Ratio S/B.

Por otra parte, el ratio  $CO/CO_2$  crece con el aumento del Ratio S/B, pero cuando tiende a estabilizarse por encima de 1.4 cuando se gasifica a partir de ratios S/B de 1.0 equivalentes al 50% de contenido de vapor. Esto puede deberse al incremento de las reacciones WGS que equilibran la reacción de Boudouard que es la principal generadora de CO. El ratio  $CH_4/H_2$  presenta un leve incremento en el rango de variación del contenido de vapor, el cual se ve acelerado a partir de 50% de vapor. Este comportamiento tiene razón en el favorecimiento de la reacción de reformado de  $CH_4$  y en el empeoramiento de la combustión producida en la etapa de gasificación (Debido a la ausencia de aire disponible), lo que afecta negativamente a la

temperatura de reacción dentro del gasificador y además, favorece la producción de CH<sub>4</sub> vía metanación o gasificación.

La tabla 5.34, obtenida del análisis realizado en Statgraphics Centurion, muestra los resultados ajustados a un modelo de regresión, puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las razones de las especies y el % vapor con un nivel de confianza del 95,0%, excepto para El ratio CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>.

Tabla 5.34. Análisis estadístico al Ratio S/B Vs la razón de las especies en el gas producto.

Variable analizada	Modelo ajustado	Valor-P	Coefficiente de correlación	R-Cuadrada [%]	Error estándar
H <sub>2</sub> /CO	$0,349406 + 0,097442 * SB$	0,0111	0,75786	57,4352	0,0624577
CO/CO <sub>2</sub>	$0,41909 + 0,644536 * \sqrt{(SB)}$	0,0006	0,886926	78,6638	0,152391
CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub>	$0,438022 + 0,0910489 * SB$	0,0671	0,599248	35,9098	0,0905666
H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>	$0,211853 + 0,249572 * SB$	0,0000	0,945453	89,3882	0,0640258

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo ajustado entre 57,4352% a 89,3882% de la variabilidad en cada una de las razones de las especies en el gas producto. El coeficiente de correlación es mayor a 0,75786, indicando una relación relativamente fuerte entre las variables. Así mismo, el error estándar del estimado indica que la desviación estándar de los residuos va de 0,0624577 a 0,152391, por lo cual este valor puede usarse para construir límites de predicción para futuros ensayos de gasificación empleando Ratios S/B, en la determinación del comportamiento de las reacciones en las propiedades del gas producto.

En efecto se puede estudiar las razones H<sub>2</sub>/CO, CO/CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>, desde una evaluación de la adición de vapor y el dosado relativo de gasificación, que permite establecer un modelo de regresión como se nota en las ecuaciones 5.15, 5.16, 5.17 y 5.18 con el estadístico R-Cuadrada superior a 41,7361%, 83,4587 %, 65,1544 % y 91,4963 %, así como un error estándar del estimado que valora la desviación de los residuos de 0,0958523, 0,164104, 0,0907257 y 0,0612569 respectivamente, generando un parámetro de predicción, como se nota en las figuras 5.38, 5.39, 5.40 y 5.41, asociado con la manera en que se desarrollan las reacciones de gasificación de lecho arrastrado con diferentes Ratio S/B.

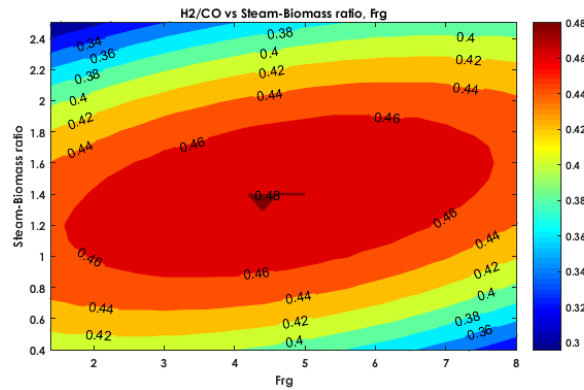


Figura 5.38 Contorno H2/CO con él Ratio S/B y Frig  
Modelo de regresión de la Razón H2/CO con él Ratio S/B y Frig

$$\text{H2/CO} = 0,007148(\text{Frig}) + 0,192526(\text{S/B}) + 0,0124483(\text{Frig})(\text{S/B}) + 0,330182 - 0,0026337(\text{Frig}^2) - 0,0902874(\text{S/B})^2 \quad (\text{Eq. 5.15})$$

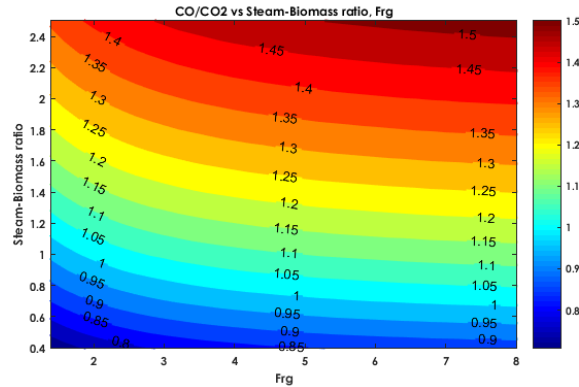


Figura 5.39 Contorno CO/CO2 con él Ratio S/B y Frig  
Modelo de regresión de la Razón CO/CO2 con él Ratio S/B y Frig

$$\text{CO/CO2} = e^{\left(-0,778569 - \frac{0,856195}{\text{Frig}}\right)} + 0,0267741 + 0,684639\sqrt{\text{S/B}} \quad (\text{Eq. 5.16})$$

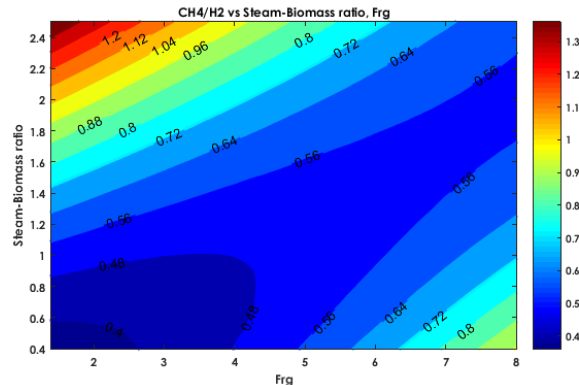


Figura 5.40 Contorne CH4/H2 con él Ratio S/B y Frig  
Modelo de regresión de la Razón CH4/H2 con él Ratio S/B y Frig

$$\text{CH4/H2} = 0,0262176(\text{Frig}) + 0,19518(\text{SB}) - 0,104853(\text{Frig})(\text{S/B}) + 0,25805 + 0,0113561(\text{Frig}^2) + 0,159866(\text{S/B})^2 \quad (\text{Eq. 5.17})$$

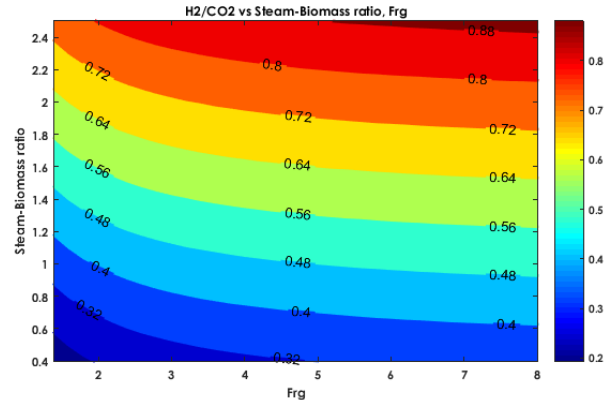


Figura 5.41 Contorno H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> con el Ratio S/B y Frg  
Modelo de regresión de la Razón H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> con el Ratio S/B y Frg

$$H_2/CO_2 = -0,731678 + 0,265626(S/B) + e^{\left(-0,000673993 - \frac{0,278381}{Frg}\right)} \quad (\text{Eq. 5.18})$$

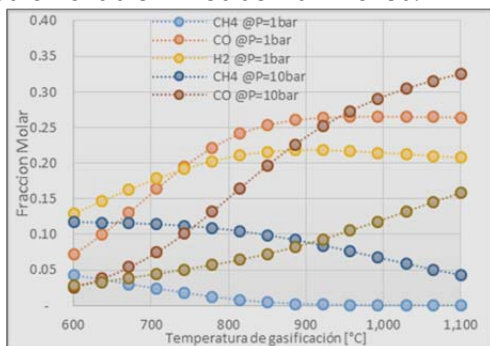
## 5.2. RESULTADOS TEÓRICOS DE LA EVALUACIÓN EXERGÉTICA DE LA BIOMASA

Para el modelo en equilibrio termoquímico y el desarrollo de la evaluación exergética de los residuos de la palma y el orujo lavado de uva, cuyo análisis elemental es mostrado en la tabla 5.35.

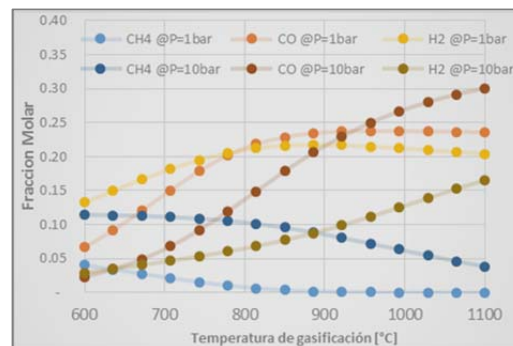
Tabla 5. 35. Análisis elemental de la biomasa modelada.

Biomasa	Elementos ( wt% base seca)				
	C	H	N	S	O
Fibra y cuesco promedio	50.27	7.07	0.42	0.63	36.28
Orujo lavado de uva	47.21	5.97	2.29	0.15	37.92

De las figuras 5.42a y 5.42b se puede apreciar que la concentración de los gases productos de la gasificación para los dos tipos de biomasa son similares, esto debido a que los análisis últimos son similares.



a)



b)

Figura 5.4210. Variación de la composición de gas producto en función de la temperatura a presiones de 1 bar y 10 bares a) de los residuos de la palma africana y b) el orujo lavado de uva.



Para el metano, la generación se ve favorecida con la gasificación a alta presión, obteniéndose para los dos tipos de biomasa valores de fracción molar de metano hasta cuatro (4) veces más altos a presión de 10 bares (0.12 a 600°C, 0.04 a 1100°C) que a 1 bar (0.03 a 600°C, 0 a 1100°C). Desde el punto de vista de la temperatura, para los dos tipos de biomasa e independientemente de las presiones analizadas, la concentración de metano disminuye al aumentar la temperatura, llegando a ser nula la generación a temperaturas mayores a 1000°C.

En el caso del monóxido de carbono, se aprecia que la presión y la temperatura afectan la concentración obtenida de forma diferente. A alta presión (10 bares), se observa que la concentración del monóxido se incrementa al aumentar la temperatura, sin embargo, este fenómeno se aprecia más para valores de temperatura entre 700°C hasta 950°C, cuando la fracción molar pasa de 0.07 a 0.25 ( $7.2 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ ). Para los valores de temperatura simulados, entre 600°C a 700°C, y 950°C a 1100°C, el incremento de la fracción molar es menor ( $5 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ ) y ( $3.3 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ ) respectivamente. Para condiciones de baja presión (1 bar), se observa que el monóxido de carbono incrementa su concentración de manera apreciable cuando la temperatura varía de 600°C hasta 950°C, pasando la fracción molar de 0.06 a 0.24 ( $6.3 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ ), de allí en adelante la fracción molar permanece casi constante en 0.24. Desde el punto de vista de la presión, se observa que la fracción molar es mayor a baja presión cuando la temperatura es menor de 950°C. Para temperaturas mayores a 950°C, se produce inversión en la tendencia, y se observa que la fracción molar del monóxido continúa incrementándose para la presión de 10 bares mientras que para la presión de 1 bar la fracción molar permanece casi constante. A 950°C, para los dos valores de presión simulados, la fracción molar es de aproximadamente 0.24.

Observado el hidrógeno a condición de baja presión (1 bar), entre 600°C y 850°C, se nota que la fracción molar aumenta de 0.12 a 0.22, aproximadamente. Para temperaturas entre 850°C y 1100°C, la fracción de molar disminuye muy suavemente pasando de 0.22 a 0.20. Este comportamiento indica que existe un máximo en la generación de hidrógeno, por lo menos para la condición de 1 bar. Para la presión de 10 bares se observa que la fracción molar aumenta de manera continua al incrementarse la temperatura, pasando de 0.03 a 600°C, hasta 0.16 a 1100°C. Independientemente del comportamiento, se nota que para el rango de presión y temperatura analizadas, las fracciones molares a baja presión siempre son mayores que a alta presión, acercándose cuando se incrementa la temperatura. Se puede asumir que habrá algún punto de mayor temperatura en el cual se inviertan los valores, como en el caso del monóxido de carbono, pero no se observa debido a la limitante en el rango de temperatura analizado.

Los resultados obtenidos fueron comparados con los datos mostrados por Lucas et al. (2004)[10] para gasificación de biomasa alimentada con aire precalentado a 350°C y presión atmosférica, en donde se muestran tendencias similares. Para el monóxido de carbono e hidrógeno, se aprecia que al aumentar la temperatura entre 600°C y 1100°C, la fracción molar de estas especies pasa de 0.15 a 30 y de 0.05 a 0.11 respectivamente. Observándose que en ambas, a temperaturas cercanas a 800°C



hasta 1100°C se alcanza un valor casi constante. Este comportamiento es similar al descrito para el monóxido de carbono e hidrógeno en la presente investigación. Para el metano, se observa que al aumentar la temperatura la fracción molar se hace cero, iniciando en 0.04. Para Lucas et al. (2004) [10] esta fracción molar nula se da alrededor de la máxima temperatura, 1100°C, mientras que en la presente investigación este valor de temperatura es de 1000°C aproximadamente. Los errores que se introducen en esta investigación se obtienen al comparar las fracciones molares máximas con los datos experimentales de Lucas et al. (2004) [10], para metano: 5%, para monóxido: 12%, para hidrógeno: 80%.

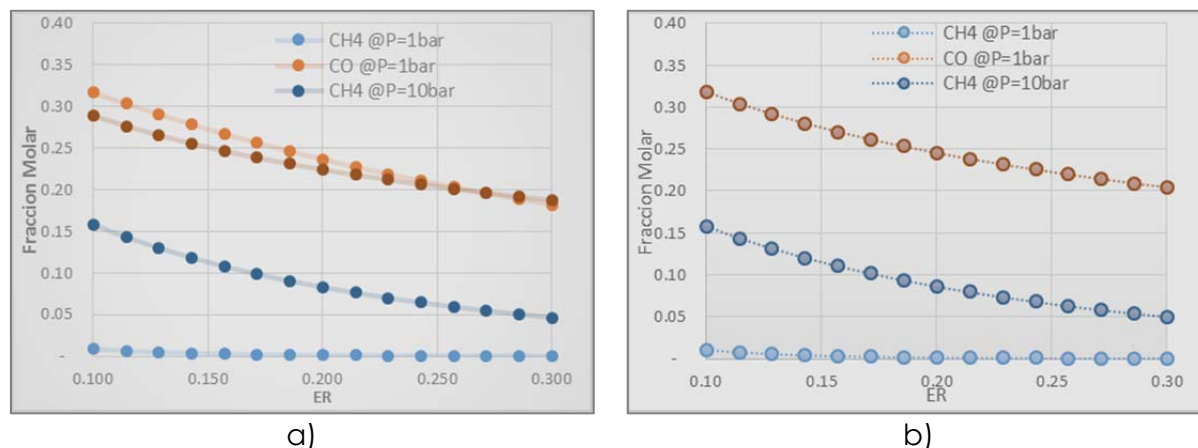


Figura 5.43. Variación de la composición de gas producto en función del ER a presiones de 1 bar y 10 bares a) de los residuos de la palma africana y b) el orujo lavado de uva.

Para el efecto de la variación del equivalente ratio (ER) o el inverso del dosado relativo de gasificación (Frg), se evidencia en las figura 5.43a y 5.43b, que la formación de gas producto  $H_2$ , CO,  $CH_4$  disminuye de manera significativa ocasionado por la mayor conversión de las reacciones en presencia de oxígeno, como consecuencia de esto el poder calorífico del gas producto disminuye junto con la eficiencia de conversión de biomasa. Al evaluar a diferentes temperaturas las eficiencias energéticas y exergética para los residuos de la palma africana y el orujo lavado de uva se nota que tanto la energía como la exergía del gas producto aumentan con las concentraciones de  $H_2$ , CO y  $CH_4$ , las cuales son favorecidas a alta presión y temperatura y con ello incrementando la eficiencia energética y exergética del proceso.

Las figuras 5.44a y 5.44b muestran la variación de la eficiencia energética y exergética para las dos presiones analizadas en función de la temperatura. En la gasificación del orujo lavado de uva se observa un mayor cambio de rendimiento energético que el dado por la biomasa de residuos de palma de aceite para los mismos rangos de operación.

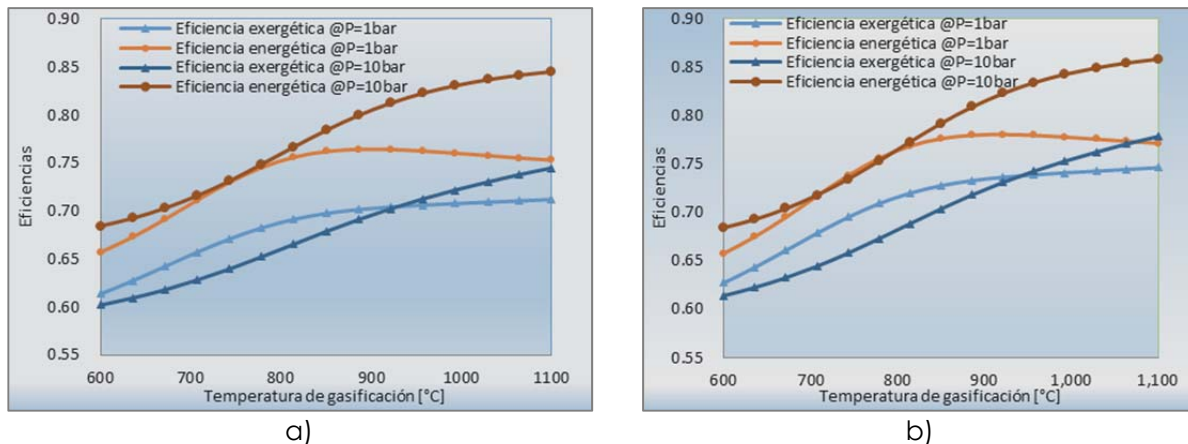


Figura 5.44. Eficiencias de primera ley y exergética a distintas temperaturas a presiones de 1 bar y 10 bares a) de los residuos de la palma africana y b) el orujo lavado de uva.

Las figuras 5.45a y 5.45b muestran la variación de la eficiencia energética y exergética como función del dosado relativo. Se observa que ambas eficiencias se reducen como consecuencia de la disminución de las concentraciones de  $H_2$ ,  $CO$  y  $CH_4$  debido por el incremento de la relación de aire/biomasa.

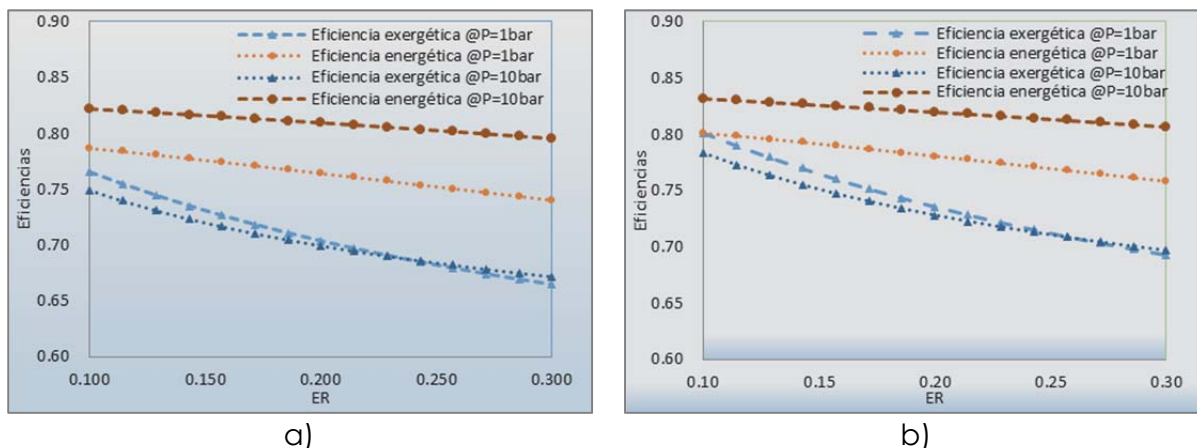


Figura 5.45. Eficiencias de primera ley y exergéticas a distintos valores de Equivalente Ratio a presiones de 1 y 10 bares a) de los residuos de la palma africana y b) del orujo lavado de uva.

Con el fin de ajustar el modelo de equilibrio termoquímico que permita parametrizar el proceso, se establecen los efectos de la temperatura y el dosado relativo mediante un análisis de superficie de respuesta a presión constante, para la eficiencia energética, exergética y el poder calorífico. Las figuras 5.46a, 5.46b, 5.47a, y 5.47b muestran las superficies respuesta del rendimiento energético y exergético de la gasificación. Donde se observa que la biomasa de orujo lavado de uva obtiene mayores rendimientos energéticos comparados con los de los residuos de la palma africana.

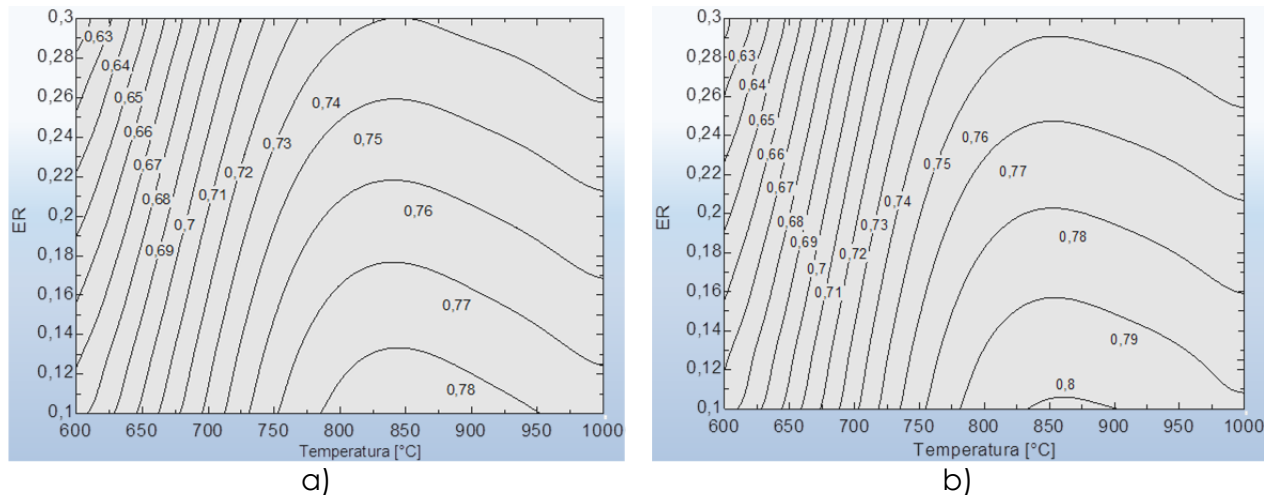


Figura 5.46. Superficie respuesta de la eficiencia energética a distintos valores de ER y Temperaturas a) de los residuos de la palma africana y b) del orujo lavado de uva.

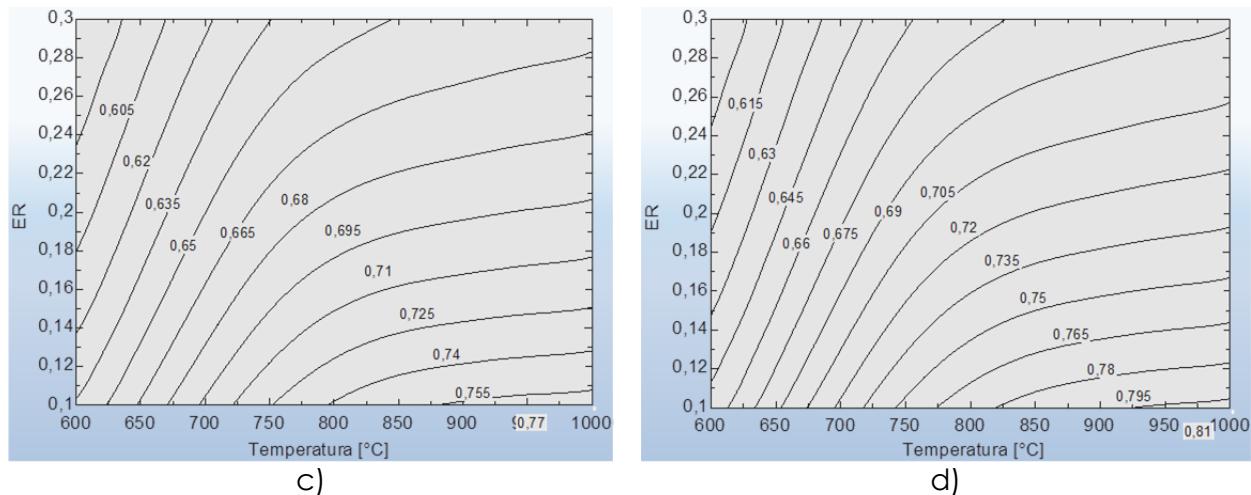
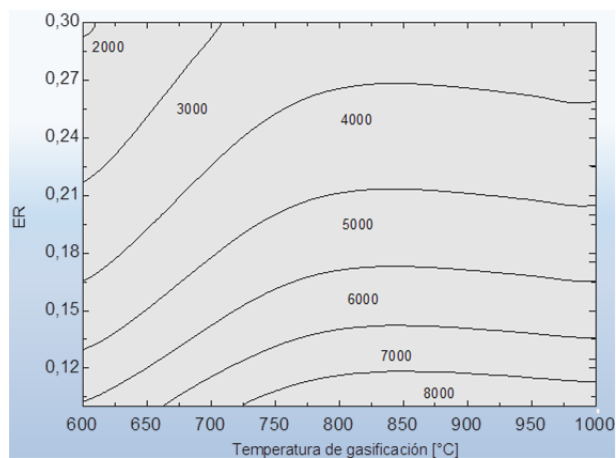
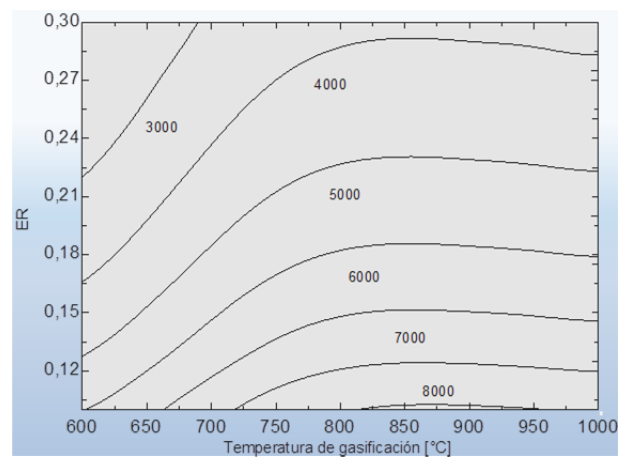


Figura 5.47. Superficie respuesta de la eficiencia exergética a distintos valores de ER y Temperaturas a) de los residuos de la palma africana y b) del orujo lavado de uva

Los cambios del contenido energético del gas producto son generados por los cambios de la eficiencia en el proceso de gasificación, los cuales son gobernados por las condiciones de temperatura, presión y cantidad de aire suministrada como agente oxidante. Las figuras 5.48a y 5.48b, muestran el valor del contenido energético del gas producto por unidad de masa [kJ/kg]. Al igual que las eficiencias de primera y segunda ley, la biomasa de orujo lavado de uvas muestra un mayor contenido energética a iguales condiciones de operación que la de la gasificación de biomasa residual de palma de aceite, sin embargo la máxima cantidad de energía en la transformación termoquímica de palma puede obtenerse a menores condiciones de temperatura.



a)



b)

Figura 5.48. Superficie respuesta del poder calorífico inferior del gas producto a distintos valores de ER y Temperaturas a) de los residuos de la palma africana y b) del orujo lavado de uva.

### 5.3. REFERENCIAS

- [1] P.M. Lv, Z.H. Xiong, J. Chang, C.Z. Wu, Y. Chen, J.X. Zhu, An experimental study on biomass air-steam gasification in a fluidized bed, *Bioresource Technology* 95 (2004) 95–101.
- [2] M. Campoy, A. Gómez-Barea, A.L. Villanueva, P. Ollero, Air-steam gasification of biomass in a fluidized bed under simulated autothermal and adiabatic conditions, *Industrial and Engineering Chemistry Research* 47 (2008) 5957–5965.
- [3] B. Acharya, A. Dutta, P. Basu, An investigation into steam gasification of biomass for hydrogen enriched gas production in presence of CaO, *International Journal of Hydrogen Energy* 35 (2010) 1582–1589.
- [4] C. Lucas, D. Szewczyk, W. Blasiak, S. Mochida, High-temperature air and steam gasification of densified fuels, *Biomass and Bioenergy* 27 (2004) 563–575.
- [5] M.J. Prins, K.J. Ptasinski, F.J.J.G. Janssen, Thermodynamics of gas-char reactions: first and second law analysis, *Chemical Engineering Science* 58 (2003) 1003–1011.
- [6] G. Gordillo, K. Annamalai, N. Carlin, Adiabatic fixed-bed gasification of coal, dairy biomass, and feedlot biomass using an air-steam mixture as an oxidizing agent, *Renewable Energy* 34 (2009) 2789–2797.
- [7] B.J. Vreugdenhil, R.W.R. Zwart, Tar formation in pyrolysis and gasification ECN-E—08- 087, 2009. <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2008/e08087.pdf> (Last accessed in November 2011).
- [8] P. McKendry, Energy production from biomass (part 3): gasification technologies, *Bioresource Technology* 83 (2003) 55–63.
- [9] P. Lv, Z. Yuan, L. Ma, C. Wu, Y. Chen, J. Zhu, Hydrogen-rich gas production from biomass air and oxygen/steam gasification in a downdraft gasifier, *Renewable Energy* 32 (2007) 2173–2185.
- [10] Lucas, C., Szewczyka, D., Blasiaka, W., y Mochidab, S. High temperature air and steam gasification of densified biofuels, *Biomass and Energy*, Vol 27, pp. 563-575 (2004)

# Capítulo VI. Conclusiones y trabajos futuros.

# Índice Detallado

	Contenido	Pág.
6.1.	CONCLUSIONES	
6.1.1.	Efecto de la adición de vapor	
6.1.2.	Efecto de la temperatura de operación	
6.1.3.	Efecto del tiempo de residencia	
6.1.4.	Efecto del dosado relativo de gasificación	
6.1.5.	Efectos en el ratio S/B	
6.1.6.	Evaluación Exergética de la Gasificación de Biomasa, bajo parámetros teóricos	
6.2.	TRABAJOS FUTUROS	



## 6.1. CONCLUSIONES

Para la realización del presente trabajo de Investigación se han llevado a cabo varios planes de ensayos experimentales con orujo lavado de uva como combustible en un gasificador de lecho arrastrado con el fin de determinar el efecto de la adición de vapor, del tiempo de residencia ( $t_r$ ), del dosado relativo de gasificación ( $F_{rg}$ ) y de la temperatura de operación sobre los distintos parámetros de caracterización del proceso de gasificación: composición del gas producto (representado por el contenido en las principales especies combustibles, CO y H<sub>2</sub>), poder calorífico y producción de gas, rendimiento de gasificación y conversión del combustible. Las conclusiones derivadas de los resultados de dichos ensayos experimentales y teóricos.

### 6.1.1. Efecto de la adición de vapor

Un incremento en el contenido de vapor del agente gasificante provoca un mejoramiento en la calidad del gas producto. Incluso después de remover los efectos del nitrógeno del aire, se observó que los contenidos de H<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> en el gas producto, se incrementaban con el contenido de vapor en tanto que un máximo en el contenido de CO ha sido hallado. Por lo tanto, el vapor tiende a promover las reacciones de reformado de vapor y water-gas shift, así como, indirectamente, las reacciones productoras de CH<sub>4</sub>.

Existe un rango óptimo de la mezcla aire-vapor que conduce a un equilibrio en el mejoramiento de la calidad del gas producto, la producción de gas y la conversión de combustible, en tanto que existe un máximo en CGS. Este rango óptimo, que se determinó para agentes gasificantes que contienen entre 40-70 % mol de vapor, parecen ser debido al efecto combiando del aire (el cual mejora la extensión de las reacciones de combustión, y por lo tanto, la desvolatilización, el craqueo secundario y las reacciones endotérmicas de gasificación debido al aumento de la temperatura) y el vapor (el cual mejora principalmente las reacciones de reformado del vapor y alquitrán y water-gas shift, promoviendo también, indirectamente, la producción de CH<sub>4</sub>).

Las producciones de CO y CO<sub>2</sub> se incrementan cuando el aire está presente en la atmosfera de gasificación en tanto que las producciones de H<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> se favorecen con la adición de vapor.

Un incremento en el ratio S/B promueve las reacciones de reformado de Char y CH<sub>4</sub>, además de las reacciones de Water-Gas shift. La producción de H<sub>2</sub> es más sensible a cambios en el ratio S/B cuando se encuentra aire presente en la atmósfera de gasificación.

### 6.1.2. Efecto de la temperatura de operación

Un incremento en la temperatura de operación posee varios efectos dependiendo del agente gasificante utilizado. La gasificación con aire tiende, principalmente, a incrementar el contenido de CO y H<sub>2</sub> en el gas producto a través de las reacciones endotérmicas de Boudouard y las reacciones de reformado de vapor mientras que la

gasificación con aire-vapor ( $\approx 56,4\%$  de contenido de vapor) conlleva a un impulso en la producción de  $H_2$  debido al mejoramiento de las reacciones de reformado de vapor-char y de WGS, así como un incremento en el contenido de  $CH_4$

### 6.1.3.Efecto del tiempo de residencia

Un tiempo de residencia más prolongado de los reactivos en el interior del gasificador (dado por una menor velocidad de entrada del agente gasificante al reactor) se ha mostrado beneficioso para el proceso de gasificación, dado que todos los parámetros (contenido en CO y  $H_2$ , poder calorífico del gas, rendimiento de gasificación y conversión del combustible) han mejorado sus valores. Esto es debido a que las reacciones de gasificación se encuentran más cerca del equilibrio debido al más prolongado contacto entre combustible y agente gasificante. El ratio  $H_2/CO$  del gas producto, en general, mostró para las biomásas ensayadas un valor constante o ligeramente decreciente, mientras que El efecto conjunto de elevadas temperaturas de reacción y mayores tiempos de residencia ha probado tener un efecto positivo sobre el proceso de gasificación, llevando a una mejora en la calidad de la composición del gas y un aumento en el ratio  $H_2/CO$ .

### 6.1.4.Efecto del dosado relativo de gasificación

Un aumento del dosado relativo de gasificación tiene como consecuencia un aumento en el contenido en especies combustibles del gas (y por tanto, un incremento en el poder calorífico del mismo), y a una disminución en la producción de gas (asociada a una menor conversión del combustible a dosados altos). Este efecto opuesto de Frg sobre el poder calorífico y la producción de gas hace que la curva de rendimiento muestre en la mayoría de los casos un máximo.

### 6.1.5.Efectos en el ratio S/B

Existe un rango óptimo de la mezcla aire-vapor que conduce a un equilibrio en el mejoramiento de la calidad del gas producto, la producción de gas y la conversión de combustible, en tanto que existe un máximo en CGS. Este rango óptimo, que se determinó para agentes gasificantes que contienen Ratio de S/B de 0,96 a 1,50, parecen ser debido al efecto cambiando del aire (el cual mejora la extensión de las reacciones de combustión, y por lo tanto, la desvolatilización, el craqueo secundario y las reacciones endotérmicas de gasificación debido al aumento de la temperatura) y el vapor (el cual mejora principalmente las reacciones de reformado del vapor y alquitrán y water-gas shift, promoviendo también, indirectamente, la producción de  $CH_4$ ).

### 6.1.6.Evaluación Exergética de la Gasificación de Biomasa, bajo parámetros teóricos

Se observa una marcada influencia de la temperatura de gasificación sobre la eficiencia energética y exergética del proceso, lo cual se explica por la enorme influencia de la exergía física de los distintos elementos que componen el gas de síntesis. En este mismo orden de ideas se encontró que la composición química de la biomasa tuvo una incidencia menor sobre las eficiencias estudiadas, pues en general

el análisis último es muy similar respecto al contenido de carbono (C) Oxígeno (O) y nitrógeno (N), adicionalmente la cantidad de calor rechazado es variable y está ligado a la temperatura del proceso de gasificación, Con base en ello se obtuvo las superficies respuesta, composición del gas, exergía, rendimiento energético entre otros

Asumiendo la gasificación adiabática, la evaluación de la eficiencia exergética para ambas biomásas se muestra inferior a la eficiencia de primera ley en un 3%. Este bajo valor indica que gran parte de la energía disponible en los gases es aprovechable químicamente en la combustión posterior para la generación de energía indicando una alta calidad energética en los gases y bajas irreversibilidades en el proceso.

## 6.2. TRABAJOS FUTUROS

Evaluar el potencial uso de oxígeno en las mezclas vapor de agua-aire y aire, con el objeto de objetivo establecer el aumento esperado incremento en la proporción  $H_2/CO$  del gas producto, y de esta forma poder obtener los modelos de regresión que determinen la cantidad óptima e la mezcla para la máxima razón.

Estudiar la formación de alquitranes en la gasificación de lecho arrastrado, cuyo objetivo es establecer las mezclas óptimas para la minimización evaluando dosado relativo, temperatura de gasificación y tiempo de residencia.

Realizar una caracterización termoquímica del char, con miras a determinar la reactividad y su potencial aprovechamiento en el proceso de gasificación, por ende se busca maximizar el contenido energético el gas, generando una disminución en el char, durante la evaluación de las condiciones de operación

Realizar el proceso de gasificación e incluirle un reformado catalítico a la salida de alquitranes, para evaluar la influencia de las condiciones de operación (temperatura de proceso, tipo de catalizador, ratio vapor/gas).

Evaluar la producción de hidrogeno, con la inclusión de proceso Water-Gas Shift a alta y baja temperatura, en el gas generado por la gasificación de biomasa.

Realizar un estudio teórico y experimental de la combustión del gas pobre, analizando que permita predecir el comportamiento energético desde la llama generada, evaluando la velocidad de llama, límites de estabilidad, índice de Wobbe, estructura de la llama, entre otras propiedades energéticas y su desempeño ambiental de las emisiones a la atmosfera.

Realizar un estudio de Co-gasificación de carbón y biomasa, para evaluar la disminución de azufre en carbón mineral de baja prestaciones energética y ambiental.

# Capítulo VII. Publicaciones, Congresos, Proyectos, Jornadas de Investigación, Premios - Reconocimientos y Revisor en Revistas - Conferencias

## ARTÍCULOS EN JOURNALS O REVISTAS RECONOCIDAS POR COLCIENCIAS

1. Hernández, J., Aranda-Almansa, G., Barva, J., Mendoza, J. (2012). *Effect of steam content in the air-steam flow on biomass entrained flow gasification*. Fuel Processing Technology, 99, 43-45.
2. Mendoza, J., Bula, A., Gómez, R., Corredor, L. (2012). *Análisis Exergético de la Gasificación de Biomasa*. Información Tecnológica, 23, 85-96.
3. Bula, A., Mendoza, J., Gómez, R., Sanjuán, M. (2012). *Syngas for methanol production from palm oil biomass residues*. International Journal of Thermodynamics, 15, 169-175.

## ARTÍCULOS EN PROCEEDINGS O PONENCIAS

1. Mendoza, J., , Gómez, R., , Ávila, A., y Cavadía, C., , EVALUACIÓN TERMO-ECONÓMICA DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE POTENCIA ELÉCTRICA MEDIANTE LA GASIFICACIÓN DE CASCARILLA DE ARROZ, 5º Congreso Internacional de Ingenierías Mecánica, Eléctrica, Electrónica, Mecatrónica, Computacional y Diseño Industrial (CIMEEM 2013) Ciudad de México México del 24 al 27 de Septiembre de 2013 (ISBN: 978-607-28-0016-8)
2. MENDOZA, Jorge, GOMEZ, Rafael y AVILA, Adrian, NOVA, Víctor y VERDEZA, Arnaldo: Biobriquettes: As a sustainable composite fuel for rural áreas in developing countries, San Diego. California. 6th International Conference on Energy Sustainability ES2012 July 23-26, 2012 ASME.
3. MENDOZA, Jorge, GOMEZ, Rafael y AVILA, Adrian, CORREDOR, Lesmes y BULA, Antonio: Analysis and Energy Optimization for Biometanol production using Palm Oil Biomass residues, Washington, 5th International Conference on Energy Sustainability, ISBN: 978-0-7918-4307-9, Agosto de 2011.
4. MENDOZA, Jorge, GOMEZ, Rafael, CORREDOR, Lesmes y BULA, Antonio: Producción de biometanol con residuos de palma africana, un análisis termo-económico, Bogotá, V Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica y II De Ingeniería Mecatrónica CIMM 2011, ISBN: 978-958-719-945-1 vol: 200 págs: 200.
5. MENDOZA, Jorge, GOMEZ, Rafael, CORREDOR, Lesmes y BULA, Antonio: Análisis exergético de la gasificación de biomasa, España, 10º Congreso Interamericano de Computación Aplicada a La Industria de Procesos CAIP 2011, ISBN-978-3-8443-3538-5.
6. MENDOZA, Jorge, GOMEZ, Rafael y BULA, Antonio: Production from palm oil biomass residues gasification, Novi Sad Servia, 24th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy, ECOS 2011.

7. MENDOZA, Jorge, BULA, Antonio y CORREDOR, Lesmes. Predicción del Rendimiento de Gasificadores de Cascarilla de Arroz en Lecho Fluidizado para Sistemas de Generación de Energía, San Juan, Argentina, Noviembre de 2010. 2do Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica II CAIM 2010 ISBN: 978-950-605-633-9
8. CUJIA, Gabriel, BULA, Antonio, MERCADO, Alberto, y MENDOZA, Jorge. Modeling and Simulation of Syngas produced from biogas Gasification Enriched with Solar hydrogen, ES 2009, San Francisco, July 19 – 23, USA. Vol. 1, pp. 97 – 103. ISBN 978-0-7918-3851-8
9. AVILA, Adrián, MENDOZA, Jorge, BULA, Antonio y CUJIA, Gabriel C: Diseño básico de una estación piloto de fluidización de residuos agroindustriales Barranquilla, IV Congreso Internacional Ingeniería Mecánica CIIM 2009, Universidad del Norte

## **INVESTIGACIONES Y/O PROYECTOS REALIZADOS**

1. PROYECTO UNIVERSIDAD-EMPRESA: “Desarrollo de integración tecnológica de recursos energéticos renovables en sistemas productivos agrícolas y agroindustriales Montería, Córdoba, Caribe”, FINANCIADO POR SISTEMA GENERAL DE REGALÍAS. Diciembre 2013-Diciembre 2016.
2. PROYECTO UNIVERSIDAD-EMPRESA: Elaboración de aglomerados de carbón y residuos de cosecha de maíz (tusa) como combustible sólido para uso industrial y doméstico.; FINANCIADO POR CVS. Febrero 2011-Enero 2012.
3. PROYECTO UNIVERSIDAD: Evaluación técnica y financiera de modelos de integración energética para la agroindustria en el departamento de Córdoba FINANCIADO POR UPB MONTERÍA Enero 2011- Junio 2012.
4. PROYECTO UNIVERSIDAD-EMPRESA: Procesamiento termoquímico de residuos generados en la producción de biodiesel para obtención de combustibles líquidos FINANCIADO POR MINISTERIO DE AGRICULTURA. Junio 2008-Junio 2010.

## **PARTICIPACIÓN EN JORNADAS INTERNAS DE INVESTIGACION Y TRANSFERENCIA**

1. Participación en la IV Jornada de Investigación y transferencia “GASIFICACIÓN DEL ORUJO LAVADO DE UVA EN LECHO ARRASTRADO”, durante los días 15 y 16 de abril de 2010.
2. Participación en la V Jornada de Investigación y transferencia “ANÁLISIS ENERGÉTICO Y EXERGÉTICO DE LA GASIFICACIÓN DE BIOMASAS RESIDUALES DE ORUJO LAVADO DE UVAS Y FIBRA DE PALMA DE ACEITE”, durante los días 07 y 08 de abril de 2011.

3. Participación en la V Jornada de Investigación y transferencia “ANÁLISIS TERMODINÁMICO DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS DE PALMA DE ACEITE CON MIRAS A LA GENERACIÓN DE GAS DE SÍNTESIS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOMETANOL”, durante los días 07 y 08 de abril de 2011.
4. Participación en la VI Jornada de Investigación y transferencia “ELABORACIÓN DE AGLOMERADOS DE CARBÓN Y RESIDUOS DE COSECHA DE MAÍZ (TUSA) COMO COMBUSTIBLE SÓLIDO PARA USO INDUSTRIAL Y DOMÉSTICO..”, durante los días 19 y 20 de abril de 2012.

## **PREMIOS Y RECONOCIMIENTOS**

1. Reconocimientos Académicos e Investigativos: Méritos Docentes durante el 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012 y 2013 de la facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Montería.
2. Becario: COLCIENCIAS – UNINORTE para estudios doctorales (2008-2013).
3. Pasantía de Investigación: Grupo de Combustibles y Motores de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad de Castilla la Mancha, España 15 de Septiembre de 2009 al 18 de Marzo de 2010.
4. Formador: de las preguntas del Saber Pro en el área Diseño de Sistemas Mecánicos con énfasis en Energía del ICFES.
5. Miembro: Moderador comité académico o científico (internacional) CAIP 2013
6. Referenciación o citación en bases de datos académicas, SCOPUS EL SEVIER
7. Jurado: XVI ENCUENTRO NACIONAL Y X INTERNACIONAL DE SEMILLEROS DE INVESTIGACION. 2013

## **REVISOR EN REVISTAS Y CONFERENCIAS**

1. Conferencias de la ASME
2. Revista Ingeniare
3. Revista DYNA
4. Revista TECNO LÓGICAS del INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO – ITM de Medellín-Colombia
5. Revista Prospectiva de la UAC de Barranquilla-Colombia